

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MEMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE

PAR  
ANAS ZOUADI

ÉCOCONCEPTION D'UN BRAS ROBOTISÉ  
POUR BORNE DE RECHARGE DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

AOÛT 2017

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

# Remerciement

*Je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.*

*Je tiens d'abord à remercier les deux personnes qui ont joué un rôle important dans la réalisation de ce travail, mon directeur de mémoire M. Souso Kelouwani et mon co-directeur M. Luc Laperrière, pour la qualité de leur enseignement, leur suivi, leurs conseils judicieux, leur disponibilité permanente et surtout leurs qualités pro-pédagogiques et humaines typiques.*

*Mes remerciements s'adressent également à M. Mohamed Habibi pour son aide, son soutien et sa générosité lors de nos nombreuses rencontres.*

*J'exprime ensuite ma gratitude aux personnels et aux professeurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières et en particulier du département de Génie Mécanique, M. Lemay Dany et M. St-Arnaud Jonathan pour leur collaboration dans les travaux réalisés au sien du laboratoire de Mécanique et Éco-Matériau et également je remercie Mme. Sylvie Godon pour son accueil, son soutien et sa disponibilité. Également, ma sincère reconnaissance à l'équipe de l'institut de recherche sur l'hydrogène – UQTR,*

*Je tiens à remercier mes parents pour leur soutien bienveillant. Je souhaiterais remercier également mes deux frères Abdetaouab et en particulier Souhaib pour leur soutien inconditionnel tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Enfin, je remercie vivement ma conjointe, Mme Fatima Zohra Echahid pour son soutien permanent.*

# Résumé

Ce travail part d'un projet global concernant la mise au point du paradigme actuel des bornes de recharges (BR) pour les véhicules électriques (VE). En fait, ce paradigme constitue un problème majeur lors de l'opération de recharge. La recharge d'un VE nécessite une intervention humaine pour une opération qui dure quelques dizaines de minutes selon la performance de la borne, ce qui représente le premier problème. Le deuxième problème concerne la distribution insuffisante des BR à cause de leurs coûts d'installation et d'exploitation élevés, ce qui limite leur nombre. Comme solution, une BR robotisée d'un aspect mobile peut être une très bonne alternative pour la recharge des véhicules électriques.

Pour mieux adhérer au concept écologique d'un produit vert comme le VE, l'utilisation d'un matériau naturel dans la fabrication d'une BR robotisée (BRR) représente un bon complément pour les véhicules électriques. À la suite du développement d'un nouveau matériau basé sur des fibres de lin au LMEM de l'UQTR, ce projet a donc pour but d'intégrer ce matériau écologique à la fabrication de la partie dynamique (manipulateur robotique) d'un prototype semblable à une BRR. Cependant, comment se comporte dynamiquement un système avec un éco-matériau afin de conserver les mêmes capacités fonctionnelles que celles du système original en métal ?

Cette thèse présente une étude comparative entre deux manipulateurs robotiques de différents matériaux, en termes dynamique et énergétique. Le premier manipulateur a des membrures en métal (alliage d'aluminium) et le deuxième, mixte, a une partie en métal et une autre partie en matériau écologique basée sur des fibres naturelles de lin imprégnées de résine époxyde.

Ce travail adopte deux méthodes d'investigation : simulation et expérimentation. Au point de départ, l'étude procède à une fabrication imitant le segment « épaule » du manipulateur

éducatif AL5B, afin d'identifier en mode hors ligne ses paramètres inertiels à l'aide de SolidWorks, dans le but de les utiliser dans un simulateur (Matlab/Simulink) du modèle dynamique du bras robotique. Par la suite, on compare les paramètres cinétiques (couples et forces) calculés avec différents matériaux. Ainsi, l'étude a permis de mettre en évidence l'influence des propriétés de masse sur le comportement dynamique du manipulateur, en concluant théoriquement, si le nouveau bras en éco-composite peut conserver la même performance que celui en métal.

Ensuite, on a eu recours à l'instrumentation du bras robotique en se servant des capteurs de courant, pour calculer l'énergie consommée par les actionneurs via la mesure de l'intensité de courant. Ceci ayant pour but de confirmer l'efficacité énergétique des éco-segments.

Le résultat fait donc ressortir la capacité dynamique et énergétique de trois structures de matériaux éco-composite (UD, MAT, UDMAT) en fonction d'une charge dans la pince du bras robotique, pour une trajectoire spécifique, et mets en évidence la structure qui représente une meilleure efficacité énergétique et cinétique par rapport au métal.

Le prototype manipulateur doit aussi remplir la fonction de la partie dynamique d'une BR mobile, pour insérer le connecteur électrique au port d'un VE. Pour cela, la mesure de la répétabilité du manipulateur est nécessaire, afin d'évaluer la performance positionnelle du bras avec les nouveaux éco-matériaux.

# Abstract

This work is part of a global project concerning the development of the current paradigm of recharging stations (RS) for electric vehicles (EV). In fact, this paradigm represents a major problem during recharging operation. The vehicle recharging requires human intervention, which represents the first problem facing the recharging stations, while the recharging operation lasts tens of minutes according to the performance of the station. The second problem concerns the inadequate distribution of RS because of their high installation and operation costs, which limits their number. Therefore, as a solution of these problems, a robotic RS of a mobile aspect can be a very good alternative for electric vehicles recharging. On the other hand, in order to remain in the ecological concept of a green product like EV, the involvement of a natural material in the manufacture of a robotic RS (RRS) will be a better complement for the electric vehicle.

Following the development of a new material based on flax fibers by LMEM of UQTR, this project aims to integrate this ecological material in the manufacture of the dynamic part (robotic manipulator) of a prototype similar to a RRS. However, how does a system behave dynamically with an eco-material in order to maintain the same functional capabilities as those of the original metal system?

This thesis presents the results of a comparative study between two robotic manipulators of different materials, in dynamic and energy terms. The first manipulator whose members are made of metal (aluminum alloy) and the second is mixed with a part of ecological material based on natural flax fibers impregnated with the epoxy resin. This work adopts two methods of investigation: simulation and experimental.

The study begins with the fabrication of an ecomaterial segment between the shoulder and the elbow of the educational manipulator AL5B, in order to identify its inertial parameters

in offline mode using SolidWorks. This is for using them in a simulator (Matlab / Simulink) of the dynamic model of the robotic arm. Subsequently, the kinetic parameters (torques and forces) calculated with different materials are then compared. Thus, the study used to point the influence of mass properties on the dynamic behavior of the manipulator, by concluding theoretically, if the new eco-composite arm can retain the same performance as the one originally made of metal.

Subsequently, instrumentation of the robotic arm was used by serving current sensors, to calculate the energy consumed by the actuators by measuring current intensity. This is to confirm the energy efficiency of eco-segments.

The result shows the dynamic and energetic capacity of each structure (UD, MAT, UDMAT) as a function of a load on the robotic arm clamp, for a specific trajectory highlighting the structure which represents a better energetic and kinetic efficiency with respect to the metal.

Furthermore, this manipulator prototype must fulfill the function of the dynamic part of a mobile recharging station, in order to insert the electrical connector in the port of an electric vehicle. For this reason, the measure of the repeatability of the manipulator is necessary in order to evaluate the positional performance of the arm with the new material.

# Table des matières

<b>Remerciement.....</b>	<b>i</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>x</b>
<b>Chapitre 1 : Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexte général .....	1
1.2. Problématique.....	3
1.3. Objectifs .....	4
<b>Chapitre 2 : Revue de la littérature .....</b>	<b>6</b>
2.1. État de l’art sur les systèmes de recharges des véhicules électriques.....	7
2.2. Évolution des matériaux éco-composites et leur intégration aux applications technologiques.....	12
2.3. Méthodes d’identification des paramètres dynamiques.....	16
<b>Chapitre 3 : Fabrication, Simulation, Identification et Instrumentation de l’éco-robot.....</b>	<b>19</b>



3.1.	Fabrication de structures en éco-composite.....	20
3.2.	Modélisation sur SolidWorks .....	22
3.3.	Simulation sur Matlab/Simulink.....	24
3.4.	Expérimentation : mesure de l'énergie consommée et de la répétabilité .....	27

## **Chapitre 4 : Analyses par simulation dynamique du bras robotique ..... 31**

4.1.	Modélisation dynamique par la méthode de Newton-Euler .....	31
4.1.1	Récurrance de passe directe : calcul des grandeurs cinématiques .....	32
4.1.2	Récurrance de passe inverse : calcul des grandeurs cinétiques .....	36
4.2.	Génération de la trajectoire .....	37
4.3.	Identification hors-ligne des paramètres inertiels.....	40
4.4.	Calcul théorique des couples des actionneurs .....	42
4.5.	Calcul théorique de l'énergie dissipée par les actionneurs .....	45
4.6.	Conclusions .....	48

## **Chapitre 5 : Expérimentations ..... 50**

5.1.	Mesure expérimentale d'énergie consommée par les actionneurs .....	50
5.2.	Répétabilité de l'éco-manipulateur robotique .....	53
5.3.	Conclusions .....	56

## **Chapitre 6 : Conclusions et Perspectives..... 58**

6.1.	Retour sur les objectifs .....	58
6.2.	Compromis poids-répétabilité .....	59
6.3.	Perspectives d'avenir.....	61

## **Références..... 63**

## **Annexe..... 67**

# Liste des figures

Figure 2-1 : Raccordement de série des véhicules électriques à la borne de recharge [9] .....	8
Figure 2-2 : Système On-Line VE [10] .....	9
Figure 2-3 : BR robotique pour le concept voiture Link & Go [15].....	10
Figure 2-4 : BR robotique tentacule par la société Tesla Motors [16] .....	11
Figure 2-5 : Volkswagen e-SmartConnect [17] .....	11
Figure 3-1 : AL5B sur sa base robotique mobile (a) et le segment choisi pour la fabrication en éco-composite (b) [44] .....	20
Figure 3-2 : Nouveaux segments d'épaule NFC semblables à celui en métal : (a) MAT (b) UD (c) UDMAT (d) segment d'alliage d'aluminium d'origine .....	21
Figure 3-3 : Assemblages choisis pour l'identification de paramètres inertiels : a- hanche b-épaule c- coude d- poignet.....	23
Figure 3-4 : Simulateur de la dynamique du bras manipulateur robotique AL5B.....	26
Figure 3-5 : Diagramme cinématique du bras robotique avec 4 ddl. (a) graphique 3D de trajectoire sur Matlab. (b) diagramme schématique de 4 ddl sur Matlab. (c) répartition des repères selon la convention d'illustration graphique en 3D et la répartition des repères selon DH.....	26
Figure 3-6 : Instrumentation de mesure de l'intensité de courant des actionneurs .....	28
Figure 3-7 : Machine de mesures des coordonnées [50] .....	29
Figure 3-8 : Bras robotique AL5B attache les charges et une sphère à son OT .....	30
Figure 4-1 : Répartition des repères selon la convention de Denavit–Hartenberg [44] .....	31
Figure 4-2 : Principe d'interpolation joint pour un mouvement trapèze en vitesse.....	38
Figure 4-3 : Génération de trajectoire des quatre joints rotoïdes.....	40
Figure 4-4 : Couples de différents actionneurs du bras en z pour les différentes structures, (a) : Hanche, (b) : Épaule, (c) : Coude, (d) : Poignet .....	44
Figure 5-1 : Comparaison de la répétabilité des quatre structures en fonction de la charge .....	55
Figure 6-1 : Consommation d'énergie de l'épaule pour différents segments .....	60
Figure 6-2 : Répétabilité du manipulateur robotisé pour différents segments .....	61

# Liste des tableaux

<i>Tableau 3.1 : Paramètres du matériau et du procédé pour la fabrication d'éco-segment.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 4.1 : Paramètres de convention de DH .....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 4.2 : Consignes pour la génération de trajectoire.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 4.3 : Paramètres dynamiques estimés pour la hanche et le coude .....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 4.4 : Paramètres dynamiques estimés pour le poignet .....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 4.5 : Paramètres dynamiques estimés pour l'épaule avec quatre structures différentes .....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 4.6 : Couples des actionneurs des différents membres en fonction de la charge.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 4.7 : Énergie cumulée pour les différentes structures en fonction de la charge .....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 4.8 : Diminution en % de l'énergie cumulée des éco-segments par rapport au Métal.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 4.9 : Écart entre l'énergie cumulée des éco-segment et le segment en Métal .....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 4.10 : Écart de l'énergie cumulée en % des éco-segment pour la même masse <math>\Delta m</math> .....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 5.1 : Expérimentation : ÉC des différentes structures en fonction de la charge.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 5.2 : Expérimentation : Baisse de l'énergie en % des éco-segments par rapport au Métal .....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 5.3 : Expérimentation : Baisse de l'énergie en % des éco-segments par rapport au Métal pour une masse uniformisée .....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 5.4 : Mesure de la répétabilité en fonction de la charge .....</i>	<i>55</i>

# Liste des abréviations

AL5B	Arm Lynxmotion <b>5</b> DOF kind <b>B</b>
BÉ	<b>B</b> aiss <b>é</b> Énergétique
BR	<b>B</b> orne de <b>R</b> echarge
CAO	<b>C</b> onception <b>A</b> ssistée par l'Ordinateur
CFN	<b>C</b> omposites à <b>F</b> ibres <b>N</b> aturelles
CG	<b>C</b> entre de <b>G</b> ravité
DH	<b>D</b> enavit– <b>H</b> artenberg
FPS	<b>F</b> ormage, <b>P</b> ressage et <b>S</b> échage
FAA	<b>F</b> ederal <b>A</b> viation <b>A</b> dministration
KAIST	<b>K</b> orea <b>A</b> dvanced <b>I</b> nstitute of <b>S</b> cience and <b>T</b> echnology
LMEM	<b>L</b> aboratoire de <b>M</b> écanique et <b>É</b> co- <b>M</b> atériaux
MC	<b>M</b> oindres <b>C</b> arrées
MI	<b>M</b> atrice d'Inertie
ML	<b>M</b> aximum <b>L</b> ikelihood
OLEV	<b>O</b> n- <b>L</b> ine <b>E</b> lectric <b>V</b> ehicle
OT	<b>O</b> rgane <b>T</b> erminal
QR	Décomposition de la forme <b>QR</b>
SVD	<b>S</b> ingular <b>V</b> alue <b>D</b> ecomposition
US	<b>U</b> nited <b>S</b> tates
UK	<b>U</b> nited <b>K</b> ingdom
VE	<b>V</b> éhicule <b>É</b> lectrique

# Chapitre 1 : Introduction

## 1.1.Contexte général

Présentement, l'impact de la progression industrielle non-verte sur la nature présente le problème contemporain le plus critique de la planète. Par conséquent, le passage vers l'industrie verte devient le centre d'intérêt fondamental de la recherche, en particulier celle sur l'automobile électrique. Ceci contribue à combattre la dégradation de notre écosystème qui représente la préoccupation majeure du monde en entier.

À l'heure actuelle, l'énergie issue des ressources fossiles est la plus utilisable. De plus, elle est encore en expansion à cause de l'intérêt croissant lié à l'important enjeu économique. Cependant, l'exploitation de l'énergie de sources non-renouvelables a un fort impact sur l'environnement. D'autre part, d'autres problèmes économiques sont liés à l'instabilité de leurs coûts et à la baisse des stocks. Cela dirige forcément la recherche pour le développement des ressources d'énergie renouvelables et des produits écologiques.

En effet, le VE et les matériaux éco-composites présentent de nouveaux enjeux environnementaux et économiques [1, 2]. Cependant, sans des vertus au moins équivalentes à celles des produits non-verts, ces nouveaux produits et leurs matériaux ne seront pas compétitifs dans le marché.

La performance de la batterie présente un enjeu clé pour la réussite commerciale des véhicules électriques. De même, le facteur de la performance des bornes de recharges concernant la rapidité de recharge, une distribution suffisante, des endroits d'accès

optimaux, un bas coût d'exploitation et l'installation, contribuent à l'intégration des véhicules électriques au réseau de transport actuel et le rendre acceptable par le consommateur [3-5]. Cela privilégie la position concurrentielle de ce produit vert industriel essentiel dans la vie quotidienne de l'individu.

D'ailleurs, le réseau des bornes de recharges est en expansion, mais devrait mener au développement de leurs performances notamment la rapidité de recharge et le mécanisme de son opérationnalité.

Aujourd'hui, on parle davantage de l'intelligence artificielle, dont la robotisation est le miroir de son implémentation. Un robot manipulateur mobile peut remplacer l'homme dans une tâche fatigante, quotidienne et répétitive ; ainsi que le robot livreur (le drone) qui est d'un aspect écologique et sécuritaire offert à un prix raisonnable. De même pour les robots médecins, qui ne remplacent peut-être pas l'homme, mais qui peuvent être pilotés tout en offrant une bonne précision lors d'une intervention médicale.

Par ailleurs, un exosquelette robotisé est présentement reconnu par sa fonction efficace dans divers domaines. Ou encore, ce qu'on appelle les robots squelettes avec des muscles artificiels, qui se rapprochent plus du paradigme du corps humain [6]. En fait, le développement technologique semble sans fin ; cependant, un équilibre dans l'utilisation quotidienne de la haute technologie est essentiel afin de ne pas perdre l'identité humaine en privilégiant une invention sensiblement similaire.

Dans le même contexte, vu le paradigme actuel des bornes de recharges, ce travail, qui part de l'idée de base du projet global sur l'écoconception d'une BR robotisée nécessairement mobile, se compose d'un manipulateur robotique, transporté par une base autonome mobile. Cette borne servira à établir une nouvelle relation originale entre le véhicule et l'infrastructure de recharge.

Ce travail traite de la question de l'intégration de l'éco-composite (lin/époxyde), en termes dynamique et énergétique, dans la fabrication d'un tel manipulateur robotique à 4 degrés de liberté. Le projet est passé par une série de travaux séparés et complémentaires, se composant d'une partie simulation et une autre expérimentale.

On présente, par la suite, différentes sections, en commençant par la problématique, l'objectif du travail, les méthodes et l'état de l'art. Ensuite une présentation détaillée sur la partie simulation et expérimentale, en finissant par la conclusion et les perspectives.

## **1.2.Problématique**

Le VE a besoin d'une batterie rechargeable pour sa mise en marche. Les utilisateurs des véhicules électriques demandent un réseau des bornes de recharges localisées aux endroits publics. Le premier problème face aux bornes de recharge actuelles concerne leurs coûts d'installation et d'exploitation élevés, ce qui limite leur nombre. Le deuxième problème concerne la nécessité d'une intervention humaine dans leur opération, ce qui amène une répartition inégale de leur taux d'utilisation, durant le jour et la nuit. Un autre problème concerne l'opérationnalité des bornes de recharges actuelles : les propriétaires des véhicules électriques doivent attendre la disponibilité des bornes de recharges. Tant que la batterie d'un véhicule précédent n'est pas chargée, on doit attendre.

Une solution intéressante concerne le développement d'une BR mobile robotisée avec des mécanismes et fonctionnalités automatiques. Ceci constitue l'objet principal d'un projet global d'une plus grande envergure donnant naissance à la problématique plus spécifique de ce travail. En fait, en vue de l'aspect écologique d'un VE, l'écoconception d'une BR autonome serait également un complément intéressant dans le réseau de transport vert.

Ce travail fait suite au développement d'une nouvelle approche de la fabrication d'un matériau composite à fibres naturelles de lin. Le projet concerne l'implication partielle de ce nouveau matériau dans un système dynamique (bras robotique). Cependant, on ne connaît pas l'avantage d'une telle écoconception. La question est donc de connaître le comportement dynamique de ce système, qui doit conserver quasiment les mêmes capacités fonctionnelles de l'original en métal.

### **1.3.Objectifs**

Dans ce travail, on tente de caractériser l'intégration de l'éco-matériau dans un système dynamique en émulant un bras robotique dont une partie est en éco-composite, basé sur des renforts naturels de fibres de lin récemment développés au LMEM [7, 8].

Le projet a pour objet la comparaison dynamique et énergétique entre deux bras robotiques avec les deux types de matériaux, en mettant en évidence des avantages prétendus ou non, d'implication d'un nouveau éco-matériau composite. L'implication est partielle en remplaçant une seule membrure originale du manipulateur robotique, fabriqué par un matériau non écologique (alliage d'aluminium).

En premier lieu on doit procéder à la mise à jour de la commande du robot en identifiant des propriétés inertielles du manipulateur. On doit aussi fabriquer la membrure en éco-composite avec différents empilements et orientations des fibres (UD, MAT et UDMAT).

D'ailleurs, une étude instrumentale portant sur le choix du bras robotique est primordiale en ce qui concerne sa partie commande, mécanique et d'actionnement, ainsi que le choix des capteurs utiles pour l'étude.



Un autre objectif concerne la mesure de la répétabilité du bras robotique. Elle sera faite en fonction d'une charge variable dans laquelle on met en évidence le bras robotique le plus répétable en utilisant les différentes structures.

La réalisation de ces objectifs répond aux questions mécaniques et énergétiques d'un manipulateur avec un nouveau matériau qui n'est pas encore connu dans les applications robotiques.

## Chapitre 2 : Revue de la littérature

Dans tout projet de recherche, la mise en position de la problématique et des objectifs fait suite à l'analyse de la littérature. On continue ainsi la recherche à partir de résultats antérieurs et on peut ainsi ouvrir de nouvelles pistes de la recherche. En même temps, c'est un moyen d'analyse critique des travaux de recherches précédents. La revue de littérature permet aussi d'établir une base des données fiable et de définir les variables du projet, tout en mettant la question de recherche dans un cadre précis et la rendre plus claire. Dans ce chapitre, trois principaux points seront analysés, pour mettre en évidence les parties essentielles du travail :

- L'innovation dans les systèmes de recharge des véhicules électriques.
- L'évolution des matériaux, le développement des éco-composites et leur intégration aux applications technologiques.
- Les méthodes d'identification des paramètres dynamiques.

L'idée générale du projet se base sur une nouvelle relation entre le véhicule et l'infrastructure de recharge. On recense donc en premier lieu les systèmes innovants de recharges des véhicules électriques, avec des versions innovantes des bornes de recharges ou de leur mode de fonctionnement.

Deuxièmement, on s'intéresse aussi dans ce travail à l'écoconception d'un bras prototype qui sera confié à remplir la fonction de la borne de recherche robotique. On doit ici caractériser le matériau éco-composite adéquat, avec des propriétés mécaniques performantes, pour ensuite mettre en évidence ses contraintes matérielles pour avoir une idée de son efficacité dans sa fonction surtout en matière énergétique. Il semble ici

nécessaire d'avoir une vision large sur le niveau d'intégration des matériaux écologiques aux applications technologiques et notamment robotiques.

Troisièmement, une fois que la fabrication des éco-segments est mise au point, on identifie leurs propriétés inertielles pour les utiliser dans le calcul dynamique du manipulateur. Cela nécessite donc la recherche des méthodes d'identification existantes et en choisir une adéquate pour notre application.

## **2.1. État de l'art sur les systèmes de recharges des véhicules électriques**

On traite dans cette section de la revue de la littérature de nouveaux systèmes innovants pour la recharge de véhicules électriques. Comme mentionné précédemment, le VE fait partie des technologies à faible impact écologique [1]. Une recherche intéressante porte sur la mise en évidence de la stratégie adoptée dans le cadre du programme de développement des produits verts [1]. Les auteurs analysent la stratégie de Renault pour la commercialisation du VE qui s'intègre au réseau de transport actuel. La société Renault *“ a déjà investi 4 milliards d'euros dans un ambitieux programme comprenant quatre véhicules présentés au salon de Paris en 2010 dont les premiers seront commercialisés à La fin de 2011 ”* [1]. Deux approches sont envisagées dans la stratégie : la première se base sur la construction d'un écosystème micro-local en ce qui concerne le mode de recharge, les équipements publics de recharge, les tarifs électriques, etc. La deuxième approche consiste au développement d'un prototype du VE au niveau de la motorisation et de la batterie.

Dans le même contexte précédent, la société française *Modulowatt* [9] développe une BR intelligente, présentée en version démonstrateur (au salon de l'automobile 2010 de Paris), c'était dans le cadre des systèmes de transport innovants (fig. 2.1). Cette BR présente un nouveau concept de liaison entre le véhicule et la BR basé sur l'automatisation de la

connexion physique. Ce système de *Modulowatt* est constitué d'une infrastructure de recharge mains libres et un système embarqué dans le véhicule [9]. Ce système est classé parmi les technologies qui tentent de redéfinir un nouveau concept entre le véhicule, le conducteur et l'environnement routier [9]. L'architecture du système *Modulowatt* se compose principalement du module de raccordement automatique et celui de perception appliquée au système de la borne et du véhicule. Une communication sans fil permet à la borne d'aider le véhicule à se positionner correctement pour l'opération de recharge. Ce dernier à la capacité de se stationner de manière autonome d'une façon à faciliter l'opération de recharge. Un bras mécanique assure le raccordement physique automatique sans intervention du conducteur. De plus, ce système *Modulowatt* offre la possibilité de brancher plusieurs véhicules électriques à une même source électrique de recharge.

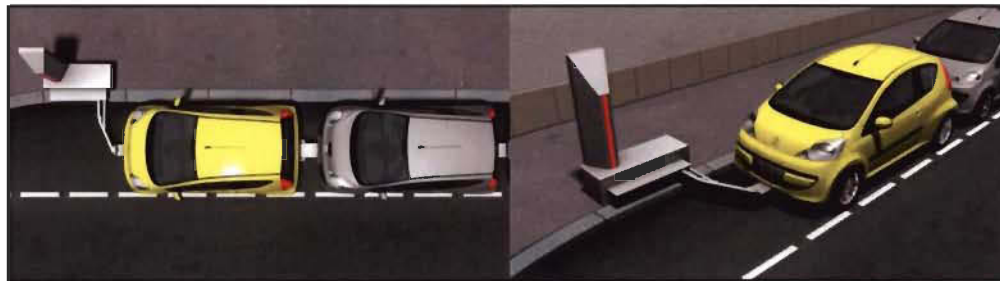


Figure 2-1 : Raccordement de série des véhicules électriques à la borne de recharge [9]

L'institut Coréen de la Science et de la technologie (KAIST) en Corée du Sud, a développé un prototype de VE qui utilise la solution de recharge sans fil [10] (fig. 2.2). Le prototype porte le nom d'*On-Line Electric Vehicle* (OLEV). C'est un système innovant de recharge de la batterie du VE sans connexion physique. Le système utilise la technologie d'induction pour recharger la batterie du véhicule. Il se compose des émetteurs de puissance avec des câbles d'induction enfouis sous la route et des capteurs d'énergie installés au-dessous du châssis du véhicule. Ceux-ci servent au transfert de l'énergie transmise directement au moteur pour sa propulsion dans le cas où la batterie aurait déjà comblé la recharge. Il s'agit d'électrification de route. Les véhicules électriques

classiques, qu'ils soient entièrement électriques ou hybrides, demandent inévitablement une pause pour recharger leurs batteries, en revanche la technologie adaptée au système de OLEV offre au véhicule la possibilité de recharger sa batterie même au cours de son déplacement. Cela présente un avantage concurrentiel visant à réduire le temps d'arrêt du VE pour la phase de recharge. En 2010, l'OLEV est classé parmi les 50 meilleures innovations par *Time Magazine* [11]. Elle traite également le problème de la taille de la batterie et de la répartition économique des émetteurs de l'énergie enterrés, tel qu'ils ont un impact direct sur le cout total du système [10].

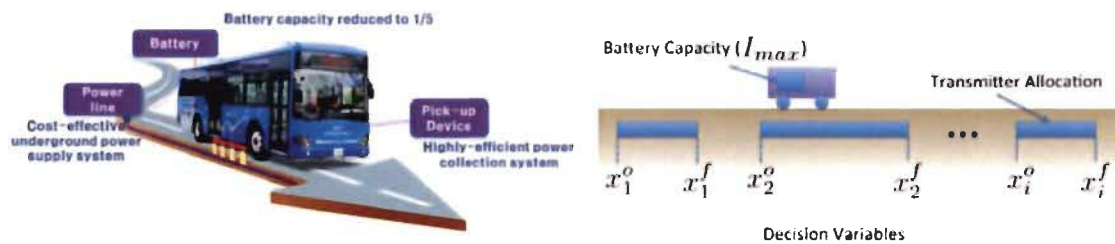


Figure 2-2 : Système On-Line VE [10]

La stratégie adoptée pour le développement de l'infrastructure de recharge traduit les orientations concurrentielles des développeurs des véhicules électriques. Dans la littérature en matière de développement du VE et les bornes de recharge, la plupart des recherches scientifiques réalisées [3-5, 12-14] abordent principalement les trois questions suivantes : le temps de recharge des batteries, la taille de batterie, le déploiement optimal des bornes de recharge et leur localisation aux positions optimales.

Par ailleurs, le développement dans le domaine industriel va très rapidement en matière de la robotisation des bornes de recharges. À la différence du domaine industriel, la recherche scientifique ne présente aucun travail dans ce contexte. Cette absence pose le problème de manque d'informations autour du sujet traité. Il y a bien quelques exemples concrets des bornes de recharges autonomes, mais il n'y a aucune diffusion d'information

concernant ces travaux à l'exception des communications de presse. Les trois différents projets réalisés sur la robotisation des bornes de recharges par trois compagnies, qui travaillent dans le secteur d'automobile, seront présentés dans la suite.

Le premier exemple de la BR automatisée, fabriquée par la société *DBT* en collaboration avec *Controlsys* [15] (fig. 2.3), est présenté au salon de Genève en 2013 à côté d'un concept de voiture entièrement électrique autonome sous le nom de *Link & Go*, développé par la société française d'ingénierie *AKKA* [15]. Ce prototype intelligent de voiture urbaine utilise la borne robotisée pour recharger sa batterie via le bras robotique manipulateur qui fait brancher le connecteur du câble au port de la voiture à l'aide d'un capteur vidéo. Le mode de fonctionnement de la borne est entièrement autonome sans intervention humaine. Ces deux innovations en couple s'inscrivent dans la suite de la technologie future de transport.



Figure 2-3 : BR robotique pour le concept voiture Link & Go [15]

La société américaine Tesla Motors, constructeur des voitures électriques, a lancé un nouveau concept de BR automatique compatible avec son modèle de voiture électrique *Tesla S* (fig. 2.4) [16]. Ce deuxième exemple de la BR automatique présente l'une des innovations inspirées de la nature. La conception du système de recharge flexible imite le corps d'un serpent pour l'accrochage automatique du porteur de bras au port du véhicule.

Ce genre de robot flexible est souvent utilisé dans le domaine médical (robots chirurgiens).



*Figure 2-4 : BR robotique tentacule par la société Tesla Motors [16]*

Le dernier exemple présenté dans cette section concerne une station de recharge robotique développée par la société *Volkswagen* (fig. 2.5) [17]. Les concepteurs utilisent le populaire robot industriel allemand *KUKA*. La vidéo publiée sur le site média [17] de Volkswagen démontre l'autonomie entière de fonctionnement.



*Figure 2-5 : Volkswagen e-SmartConnect [17]*

Tous ces travaux sont destinés à l'autonomie de l'infrastructure de recharge du transport vert. Ces solutions présentent la plupart du temps, une partie statique de la borne et une

extension robotisée, limitant ainsi le nombre de véhicules rechargeable par période. Par ailleurs, aucune solution technologique n'a été rapportée en ce qui concerne deux aspects :

- l'intégration de matériaux écologiques de manière à réduire l'impact environnemental des bornes
- la mobilité spatiale de ces bornes, c'est-à-dire, la capacité d'une borne de se déplacer de manière autonome vers un véhicule stationné pour le recharger.

## **2.2. Évolution des matériaux éco-composites et leur intégration aux applications technologiques**

L'évolution de la technologie exige de nouveaux procédés industriels utilisant des matières premières plus écologiques. Des temps préhistoriques à ce jour, l'évolution des matériaux est une quête sans fin. Cette évolution nous fait passer des « *matériaux de rencontre aux matériaux sur mesure* » [18]. En fait, ce passage permet de répondre à de nouvelles exigences multicritères. Le monde des matériaux en est un qui varie selon les besoins et les caractéristiques désirées du matériau [18].

Tout au début, seulement les matériaux naturels étaient disponibles. Un peu plus tard, les céramiques, le verre et quelques métaux nouveaux étaient développés. À la fin du moyen âge, du point de vue de la science, le monde des matériaux est encore peu innovant. Par contre, il est extrêmement évolué en terme d'utilisation [18]. À la suite de la progression des matériaux, l'acier est devenu le matériau de structure essentielle. Ensuite, le plastique est apparu avec le développement de l'industrie pétrolière et l'utilisation de polymères artificiels [18].

Aujourd'hui, on assiste à une explosion des études consacrées au développement de matériaux nouveaux. Le choix du meilleur matériau possible à utiliser n'est pas toujours évident [7, 8, 19-21].



Dans la situation actuelle, le nombre de matériaux disponible pour l'ingénieur est estimé entre 50 000 à 80 000, avec quelque 3000 procédés pour les mettre en œuvre [18]. Cette situation conduit à une compétitivité dans l'industrie de première transformation, de même que dans les différents secteurs industriels [18, 21].

À l'heure actuelle, les matériaux de sources fossiles non-renouvelables occupent une place importante dans la vie des individus et dans l'industrie afin de répondre à leurs besoins. Plusieurs recherches [7, 8, 19, 22-24] visent à améliorer la qualité de ces matériaux, et à introduire de nouvelles méthodes de fabrications. On désire de bonnes propriétés mécaniques tout en considérant le problème d'efficacité économique et énergétique dans le domaine industriel.

Dans le monde des matériaux, les polymères sont l'une des trois grandes familles de base, avec les métaux et les céramiques [20]. Les polymères synthétiques sont des matières omniprésentes dans notre vie quotidienne et ils sont utilisés dans une multitude de secteurs. Cependant, ces matériaux ont un impact très négatif sur l'environnement. Ainsi, les chercheurs tentent dorénavant de développer des polymères à base végétale comme une alternative aux sources fossiles [20].

Contrairement aux matériaux traditionnels, les matériaux composites sont souvent plus performants en termes de propriétés spécifiques (propriété divisée par le poids), utilisés dans des applications de haute technologie dans différents domaines. L'étude de ces matériaux se divise en différents thèmes pertinents [19].

L'utilisation des matériaux composites à fibres synthétiques pose deux problèmes majeurs. Premièrement, ils ont un caractère non-dégradable. Deuxièmement, leur fabrication exige des sources d'énergie fossiles. On a donc vu apparaître de nouveaux matériaux composites avec des caractéristiques écologiques. À l'échelle mondiale, on

assiste entre autres à une explosion des études portant sur l'élaboration des matériaux composites à fibres naturelles, ou CFN [7, 8, 25].

C'est dans ce contexte qu'est né le laboratoire de Mécanique et Éco-matériaux (LMEM) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) [26]. Plusieurs études y sont effectuées. On y développe entre autres un nouveau renfort éco-composite constitué de fibres naturelles de lin unidirectionnel (UD) biodégradable. On tente ainsi d'exploiter la richesse du territoire canadien en ce qui concerne la plante de lin (le Canada est le plus grand producteur de graines de lin au monde).

Parmi les travaux récents du LMEM, on note le développement d'un tout nouveau renfort avec fibres longues de lin ou de chanvre UD et fibres courtes de papier [7]. On tente d'évaluer l'effet de la couche de papier sur la performance du renfort (perméabilité et propriétés mécaniques). Les résultats des essais de traction démontrent que la présence d'une couche de papier augmente la résistance du composite dans des proportions de 26% et 13 % pour le lin et le chanvre, respectivement. On pense que la présence des couches de papier pourrait contribuer à absorber et à homogénéiser la taille des défauts et par conséquent contribuer à minimiser la variabilité de la résistance du composite.

Un autre aspect important qui a été pris en compte dans cette étude est la perméabilité du renfort. Les couches de papier affectent négativement la perméabilité du matériau éco-composite, ce qui a un impact sur les temps de production pour les procédés d'injection de résine. En comparant la perméabilité du renfort lin/papier avec celles des tissés de fibre de verre il a été constaté que le nouveau renfort est beaucoup moins perméable [7].

Finalement, la présence d'une couche de papier provoque la diminution de la rigidité de la pièce imprégnée (diminution du module de Young). Par contre, elle semble aussi diminuer la variabilité de la résistance ultime du composite [7, 8]. Contrairement aux fibres de verre, dont le procédé de fabrication est bien contrôlé, les fibres naturelles ont

des propriétés intrinsèques très variables. La qualité des fibres est influencée par les conditions météorologiques et dépend de la technique utilisée pour leur extraction [7].

Plusieurs chercheurs qui travaillent dans le domaine du développement des matériaux croient aux bénéfices et au potentiel des fibres naturelles. De plus en plus les propriétés des CFN s'approchent de celles des composites de fibres synthétiques [7, 8, 27]. La clé de leur performance réside dans la qualité de l'adhésion fibres-matrice [19, 27] (i.e. entre le renfort de fibre et la matrice de résine). Une mauvaise compréhension des interactions entre ces deux éléments de base affecte l'efficacité des composites des fibres naturelles. Une meilleure compréhension des propriétés mécaniques est encore nécessaire pour en arriver à une solution de remplacement total ou partiel des composites à fibres synthétiques.

L'état des recherches actuelles sur le développement des éco-composites est tel que la mise en évidence de leur atout a conduit à une impression favorable pour leur application dans l'industrie [21]. Les résultats des recherches effectuées au sein de LMEM sont exploités dans les nouveaux projets concernant l'intégration des composites des fibres naturelles (notamment les fibres de lin) dans des applications technologiques. Cela traduit la motivation des chercheurs à contribuer au développement durable [26]. Un autre projet du LMEM concerne le développement d'engrenages plastiques renforcés de fibres naturelles de bois [28, 29].

Le magazine *Materials Today* annonce l'approbation imminente par la FAA des US et du UK de l'utilisation des fibres naturelles dans les structures aérospatiales [30]. De même, dans le secteur de construction automobile, l'utilisation des fibres naturelles a commencé par des composantes intérieures [31, 32]. Les panneaux de garniture intérieure de porte d'automobile en fibres de lin/sisal par *EMPE-Findlay* [32] présentent un exemple concret de l'intégration des fibres naturelles dans l'industrie d'automobile. Cela représente la

première étape pour avoir un véhicule plus vert. Cependant, il n'existe pas encore de travaux de recherche qui s'intéressent à l'intégration des CFN aux applications robotiques.

### **2.3.Méthodes d'identification des paramètres dynamiques**

L'identification des paramètres d'un système est un problème abordé dans les travaux consistant à prédire un modèle dynamique d'une boîte noire (absence de connaissance fine des modèles mathématiques) ou bien d'un modèle de connaissance. Elle est principalement basée sur l'estimation des paramètres qui décrivent la dynamique d'un système [33]. Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été réalisés dans différents secteurs industriels (robotique, automobile, électromécanique, aéronautique, etc.) [33-36]. Les méthodes utilisées pour l'identification se divisent en deux catégories : hors ligne et en ligne [37]. La première catégorie regroupe trois approches : les essais expérimentaux, le calcul par CAO et les techniques d'identification. La deuxième catégorie regroupe deux approches : la commande adaptative et les réseaux de neurones.

Un bon choix de ces méthodes permet d'estimer les paramètres avec plus de précision afin d'assurer la validité du système. L'identification par moindres carrées (MC) est la méthode la plus utilisée en robotique, en utilisant un modèle dynamique inverse du robot linéaire surdéterminé [38] [39]. La linéarisation du modèle se fait à l'aide des deux méthodes introduites par (Wissama Kh. Etienne D.) [39, 40] : la méthode formelle et la méthode numérique basée sur une technique de factorisation (SVD, QR). Cependant, la méthode MC est plus sensible à la mesure de bruit [39, 41]. Pour surmonter ce problème, il y a deux solutions rapportées dans le travail [39]. D'autre part, (Pruefer, M., al.) [39] démontrent les avantages du modèle intégral en comparaison avec celui différentiel. Le modèle intégral proposé par (Gautier et Khalil) [42] ne nécessite pas les mesures de l'accélération. Cela limite l'effet du bruit dans les mesures des paramètres inertiels. La deuxième solution consiste à l'utilisation du filtre passe bas au cas du modèle différentiel [39]. De plus, le choix d'une trajectoire optimale du bras contribue à l'excitation de tous

les paramètres inertiels inconnus, ce qui conduit au bon conditionnement de la matrice d'observation [40]. Ceci permet d'éviter la perturbation des éléments de la matrice par les erreurs de mesures des paramètres.

(Olsen, M. M. Petersen, H. G.) [43] utilisent une nouvelle alternative afin d'améliorer les valeurs estimées des paramètres dynamiques des deux premiers membres du robot Mitsubishi PA-10. Il s'agit de la méthode du maximum des vraisemblances (ML) qui est peu connue chez les roboticiens. Les auteurs de l'article [43] démontrent les avantages de la méthode ML en comparaison avec d'autres méthodes existantes. En même temps, cette méthode pose le problème du calcul des dérivés de 2ème et 3ème ordre [43]. Cela peut être corrigé par la linéarisation du système d'équations.

D'autre part, la méthode expérimentale est faiblement utilisée pour l'identification des paramètres dynamiques, à cause de la difficulté de démontage et montage d'un manipulateur industriel [40]. Toutefois, cette méthode pourrait être appliquée par le fabricant avant l'assemblage du robot. Cette approche expérimentale nécessite des appareils de mesures avec une haute précision [37].

Les auteurs (Wu, Jun, al.) [33] suggèrent de valider le modèle en procédant comme suit : la comparaison de la validité des valeurs des paramètres estimés pour deux trajectoires différentes, la comparaison des résultats des deux modèles dynamiques et énergétiques, la redéfinition des paramètres de base en ajoutant une charge portée par le robot.

L'identification des paramètres inertiels d'un robot manipulateur peut aussi se faire à l'aide de son modèle CAO (annexe 1 et 2). C'est un autre outil d'identification hors ligne connu en matière robotique. Il s'agit d'un calcul des propriétés inertielles via une conception quasi-identique du système réel étudié. En fait, cette méthode est privilégiée pour sa facilité de calcul, sa rapidité d'exécution (gagne du temps), et l'extraction de nombreuses variantes simultanément. Cependant, elle présente une imprécision dans le

calcul des paramètres dynamiques, puisque le modèle CAO n'est pas fidèle à cent pour cent au système réel. En effet certains détails qui font partie de l'assemblage ne peuvent pas parfois être modélisés [37].

## **Chapitre 3 : Fabrication, Simulation, Identification et Instrumentation de l'éco-robot**

La simulation et l'expérimentation représentent le mode d'investigation adopté dans ce projet pour atteindre son objectif. Il s'agit de la simulation des nouveaux segments en éco-composite après leur fabrication et leur modélisation dynamique. Ensuite, une instrumentation du manipulateur physique est réalisée afin de confirmer ou pas le résultat ressorti de la simulation. La méthode dépend de la nature de l'objectif et des contraintes du projet (le délai, les moyens financiers, la disponibilité du matériel chez le fournisseur, etc.).

L'idée se base sur la simulation du modèle prédit pour avoir une vision globale sur son fonctionnement, et cela donne un moyen pour juger de l'efficacité et de la performance du modèle sans recours direct à l'expérimentation. Ceci est fait puisqu'on ne savait pas si le système sera capable de garder sa performance dynamique en changeant une de ses membrures en alliage d'aluminium, par un nouveau éco-matériau encore inconnu dans les applications robotiques. En ce fait, au début du projet, cette méthode permet de ne pas passer directement par l'instrumentation du robot physique pour éviter une perte de temps.

La fabrication de la membrure choisie imite l'original tout en gardant la même forme. On identifiera les paramètres inertiels (masse/densité, centre de gravité, matrice d'inertie) des nouveaux segments après les avoir modélisés sur SolidWorks. Ensuite, le calcul des paramètres cinétique sera fait par le simulateur Matlab/Simulink en comparant les différentes structures. Enfin, on fait ressortir des calculs de l'énergie consommé par des actionneurs à l'aide d'une instrumentation de mesure.

Notre choix du système dynamique s'est porté sur le bras robotique éducatif *Lynxmotion* à 4 degrés de liberté (annexe 3), illustré à la fig. 3.1a. Il sera adapté pour remplir la fonction d'un prototype similaire à une BR mobile.



*Figure 3-1 : AL5B sur sa base robotique mobile (a) et le segment choisi pour la fabrication en éco-composite (b)*  
[44]

En premier lieu, on va changer une seule membrure de robot, stratégiquement choisie entre l'épaule et le coude du manipulateur, parce qu'elle supporte plus de charges (fig. 3.1b). Cela permettra d'effectuer des tests dynamiques comparatifs du fonctionnement du bras robotique avec le nouveau matériau.

### **3.1.Fabrication de structures en éco-composite**

Trois nouvelles structures seront utilisées pour construire les nouveaux squelettes robotiques mixtes de métal-éco-composite : fibre longue unidirectionnelle (UD), fibre longue unidirectionnelle avec fibre courte (UDMAT), et fibre courte (MAT). La fabrication des renforts de lin imprégnés de résine époxyde est obtenue par la méthode de FPS (Formage dynamique, Pressage et Séchage) en suivant les principes de la fabrication définis par le laboratoire LMEM dans leurs travaux de recherches précédents [45-47]. En outre, les paramètres du matériau et du procédé sont considérés (tab. 3.1) dans l'opération.

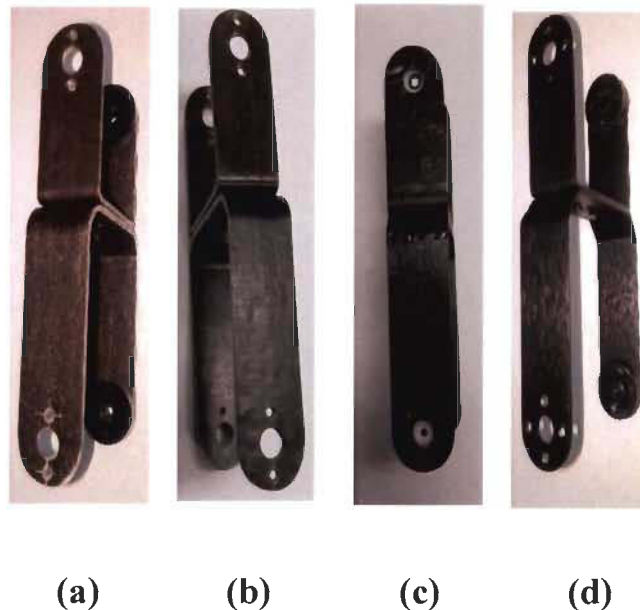


**Tableau 3.1** : Paramètres du matériau et du procédé pour la fabrication d'éco-segment

	Densité surfactive du renfort (g/m <sup>2</sup> )	Densité volumique du composite (g/m <sup>3</sup> )	Épaisseur de la pièce moulée (mm)	Fraction volumique de renforts (%)
<b>UD</b>	320	1450	1.83	36.17
<b>MAT</b>	100	1450	1.50	41.37
<b>UDMAT</b>	420	1450	2.20	39.49

En fait, le choix des valeurs de ces paramètres est fait sans but précis. On a tenté de fabriquer des échantillons dont la forme ressemble à celle de la membrure en métal. En réalité elles peuvent avoir des dimensions sensiblement différentes (Annexe 4).

Ensuite, après avoir préparé la couche de lin par le procédé mentionné précédemment, on procède à son formage dans un moule en bois, puis on imprègne la couche d'époxyde, en finissant par le séchage dans le four. La dernière étape de la fabrication consiste à l'usinage du segment moulé (fig. 3.2) afin d'obtenir un produit fini, semblable à l'original en métal.



*Figure 3-2 : Nouveaux segments d'épaule NFC semblables à celui en métal : (a) MAT (b) UD (c) UDMAT (d) segment d'alliage d'aluminium d'origine*

### 3.2. Modélisation sur SolidWorks

*SolidWorks* est une des plateformes de conception la plus utilisée dans la modélisation dynamique d'une pièce unique ou d'un assemblage. Dans ce travail, ce logiciel sert pour le calcul de propriétés de masse du segment fabriqué en éco-composite. Il s'agit d'une méthode hors ligne pour l'identification de paramètres dynamiques du système étudié [37, 38, 40].

On utilise la fonction de propriétés de masse pour extraire les paramètres inertiels du segment en question, en affectant d'abord les masses réelles mesurées des pièces qui constituent les segments du manipulateur. On refait le même calcul pour les trois structures en éco-composite, ainsi que pour toute membrure du bras robotique en métal, puisque le fournisseur du bras robotique n'offre pas les détails de conception, considérés comme des informations confidentielles du fabricant.

On s'intéresse principalement à la matrice d'inertie (MI) et au centre de gravité (CG) utilisés dans le calcul des paramètres cinétiques (couples/forces). La MI dépend seulement de la géométrie et de la masse du segment, selon l'équation suivante (3.1) :

$$\bar{I} = \int \bar{r}^2 dm \quad (3.1)$$

Où :  $\bar{I}$  : Moment d'inertie centroïdal

$dm$  : élément de masse

$\bar{r}$  : Distance entre un élément de masse et le CG

Pour un matériau de densité uniforme, les coordonnées du centre de masse s'expriment comme suit :

$$x_G = \frac{1}{m} \int x(M) dm \quad (3.2)$$

$$y_G = \frac{1}{m} \int y(M) dm \quad (3.3)$$

$$z_G = \frac{1}{m} \int z(M) dm \quad (3.4)$$

Où :

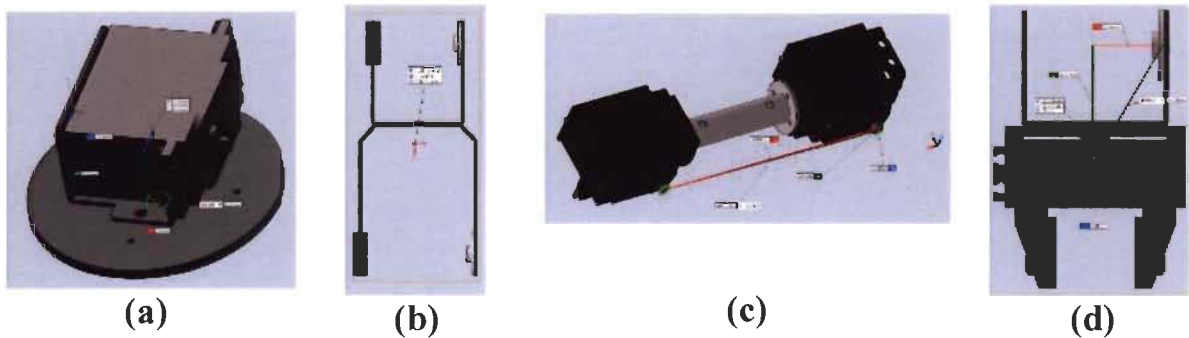
$dm = \rho(M)dV$ , Masse infinitésimale du point M (g).

$\rho(M)$  : Densité ( $g/m^3$ ).

$dV$  : Volume infinitésimale du point M ( $m^3$ ).

$m = \sum m_i$ , masse du corps homogène (g)

La position du CG par rapport à un repère inertiel dépend de la configuration de l'ensemble des segments en mouvement qui forment le bras robotique. Ce dernier est assemblé principalement par des membrures, des actionneurs et un effecteur en extrémité. Ceux-ci sont en mouvement à chaque instant de la trajectoire. D'ailleurs, dans la modélisation dynamique du système, les masses des actionneurs ne sont pas négligeables, ce qui exige, selon la méthode de Newton Euler, de former des sous-ensembles fixes du manipulateur robotique pour extraire les paramètres inertiels de chacun. Le choix des sous-ensembles est illustré sur la fig. 3.3.



*Figure 3-3 : Assemblages choisis pour l'identification de paramètres inertiels : a- hanche b-épaule c- coude d- poignet*

### 3.3.Simulation sur Matlab/Simulink

On précède à la simulation du bras robotique par une modélisation mathématique qui représente son comportement dynamique. On utilise la méthode de Newton-Euler de la forme présentée ci-dessous (3.5). Cette méthode permet d'établir la relation entre les couples/forces exercés aux actionneurs, les positions articulaires et leurs dérivées premières (vitesses) et secondes (accélérations). Il s'agit de la modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 4 degrés de libertés.

$$C_i = f(\theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i, F_i) \quad (3.5)$$

Où :

$\theta_i$  : position articulaire du membre i

$\dot{\theta}_i$  : vitesse articulaire du membre i

$\ddot{\theta}_i$  : accélération articulaire du membre i

$F_i$  : force exercée sur un membre i

$C_i$  : couple exercé sur un membre i

Le passe cinématique directe précède une passe inverse. Ces passes successives sont nécessaires pour l'établissement des équations récursives dynamiques du mouvement [48]. Le détail de la reformulation des équations dynamiques est décrit dans la section (4.1).

Après avoir développé le modèle mathématique du système, on passera à la programmation d'un simulateur en se servant de la plateforme Matlab/Simulink (annexe

5). Ce simulateur sert aux calculs des couples et des forces des joints articulaires du bras robotique selon une trajectoire désirée de l'effecteur.

Le simulateur est divisé principalement de deux parties (fig. 3.4). La première concerne la génération de la trajectoire dans laquelle les paramètres articulaires sont générés à chaque instant de mouvement du manipulateur en utilisant un trapèze de vitesse. En outre, elle permet de limiter l'allure continue de la vitesse, et discontinue de l'accélération à une valeur maximale, ainsi que de les saturer simultanément en un point de la trajectoire.

En se basant sur ce principe, tous les joints articulaires suivent leur propre trajectoire dans laquelle le mouvement du manipulateur est synchronisé. En fait, la superposition de toutes les trajectoires segmentaires donne celle de l'effecteur.

La vitesse et l'accélération maximales, la durée totale du mouvement et la position articulaire initiale et finale du joint, sont des données initiales dans la planification de la trajectoire.

La deuxième partie concerne la dynamique du manipulateur robotique, i.e. le calcul des couples et forces exercées par les actionneurs en affectant les paramètres articulaires  $(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ , les paramètres inertiels identifiés (MI, CG, Masse) et la géométrie des membrures. La simulation ne prend pas en compte des perturbations extérieures qui peuvent réagir avec la dynamique du manipulateur.

Un autre bloc de ce simulateur concerne la géométrie du bras qui servira à la définition du manipulateur dans son espace opérationnel cartésien à partir de ses données articulaires. Cela se fait avec une méthode systématique définie par la convention de *Denavit–Hartenberg* (DH). Elle sert à la répartition des repères aux différents joints.

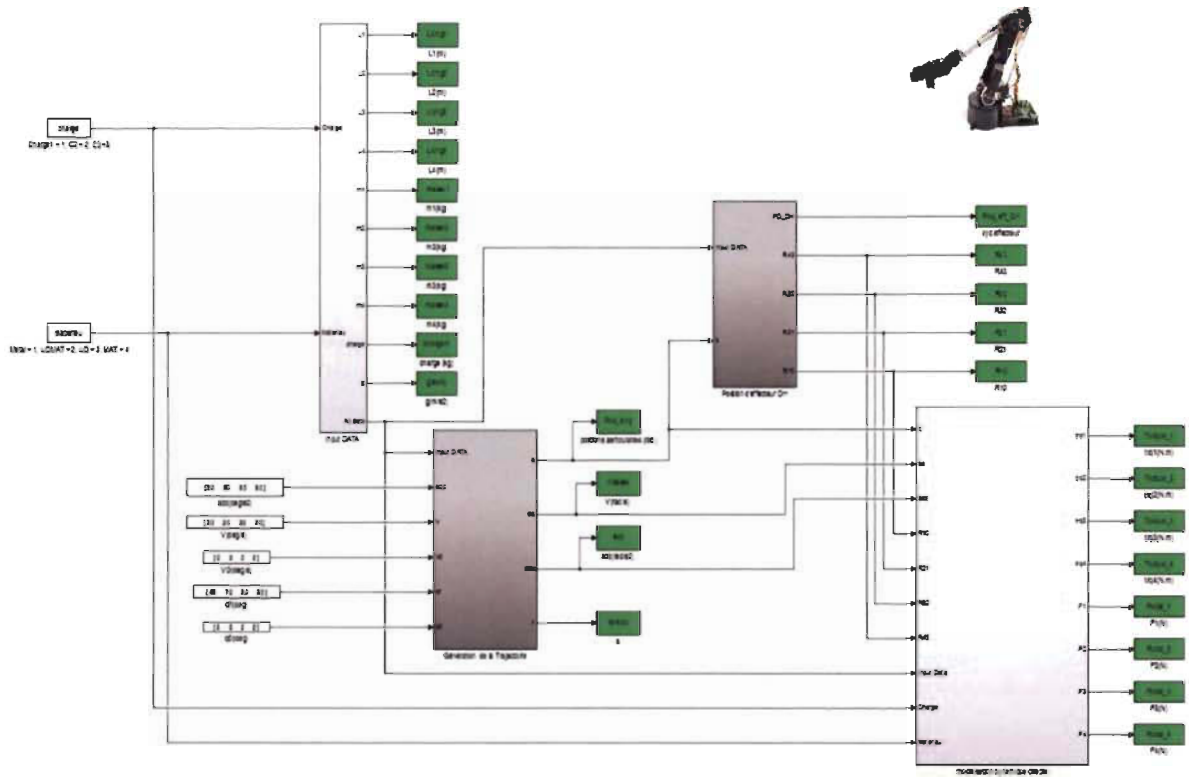


Figure 3-4 : Simulateur de la dynamique du bras manipulateur robotique AL5B

Cette approche permet une illustration graphique du bras robotique en 3D dans lequel on génère une animation similaire de contrôle du bras physique (fig. 3.5).

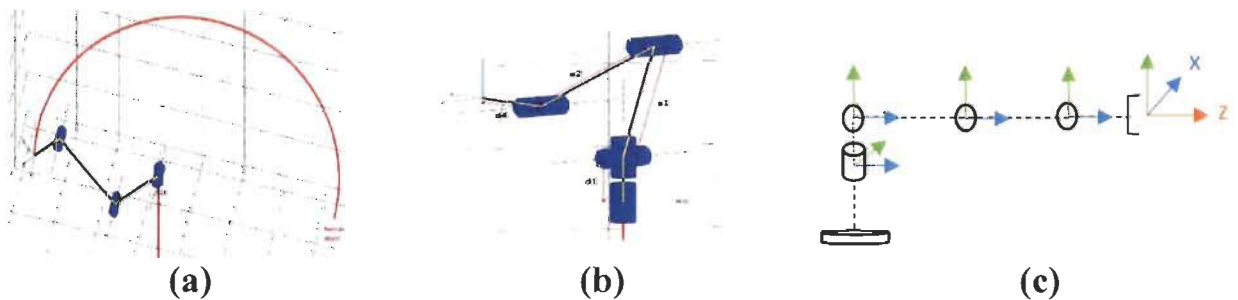


Figure 3-5 : Diagramme cinématique du bras robotique avec 4 ddl. (a) Graphique 3D de trajectoire sur Matlab. (b) Diagramme schématique de 4 ddl sur Matlab. (c) Répartition des repères selon la convention de DH

On procède finalement au calcul des couples pour diverses charges portées par la pince au cours d'une trajectoire prédéfinie, en passant par différentes configurations du bras qui mettent tous les actionneurs en action. Le type de matériau et la charge portée sont les deux variables considérées dans le calcul des couples.

### **3.4. Expérimentation : mesure de l'énergie consommée et de la répétabilité**

Après être passé par la simulation du bras robotique qui peut clarifier le fonctionnement dynamique de l'éco-manipulateur, on arrivera, dans la suite du projet, à l'instrumentation du robot physique. Il s'agit d'un test dynamique du bras robotique en fonction d'une charge variable attachée à son extrémité lors d'une trajectoire type, le matériau étant la variable de ce test. Cela dans le but de confirmer le résultat ressorti de la simulation.

La mesure de l'intensité de courant d'alimentation de chaque actionneur lors du mouvement du bras est l'objectif de la partie expérimentale. En fait, c'est la question d'évaluation de l'énergie dissipée par chaque moteur qu'on tente de traiter, en comparant les différents segments étudiés.

Cette mesure impose un choix convenable d'un capteur de courant. Le choix porte sur l'instrument de mesure ACS712 de type analogique qui offre une bonne précision avec une plage de mesure de  $\pm 5A$  pour une alimentation électrique de 5 volts.

Le signal de sortie du capteur de courant est une tension analogique proportionnelle au flux du courant qui traverse le conducteur. En fait, on traitera le signal de sortie brute du capteur de courant, dans le convertisseur analogique numérique *Arduino uno*, qui joue le rôle d'une carte d'acquisition de donnée. Une plage de dix bits réservés par le canal de conversion A/N (0 – 1023 décimaux) correspond à une image de tension entre 0 – 5 volts.



La conversion se base sur le graphique caractéristique de la variation de tension de sortie en fonction de l'intensité de courant qui ne dépasse pas 5V.

La mesure de puissance électrique de l'actionneur impose une instrumentation (fig. 3.6) qui comprend :

- cinq capteurs de courant pour la totalité des actionneurs du manipulateur.
- une carte d'acquisition des signaux sortants de tels capteurs de courant (*Arduino*)
- un système dynamique : bras robotique de quatre degrés de liberté.
- une carte de commande du manipulateur robotique (*SSC32U*).
- un ordinateur offrant une communication série avec la carte d'acquisition.

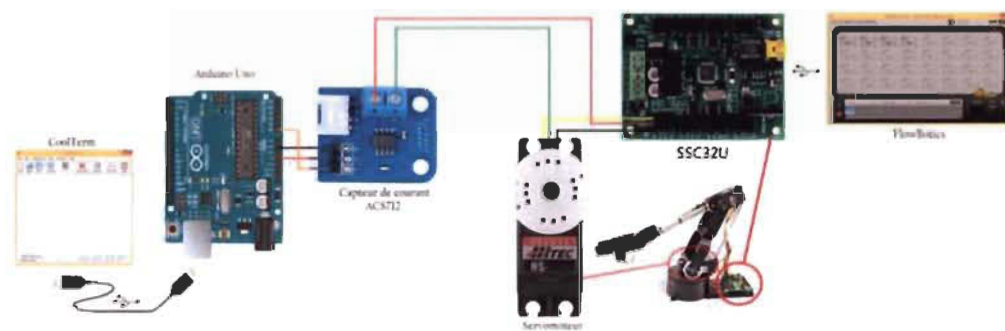


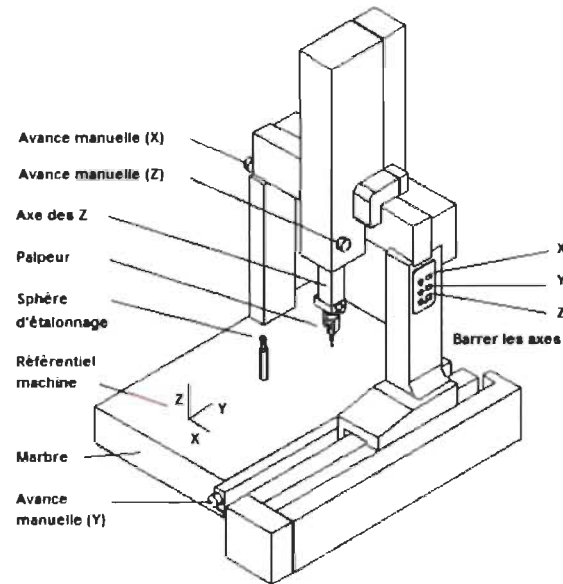
Figure 3-6 : Instrumentation de mesure de l'intensité de courant des actionneurs

La répétabilité est l'une des caractéristiques importantes dans la conception des manipulateurs. Il s'agit de mesurer la position de l'effecteur du manipulateur plusieurs fois pour un mouvement répété. Quand l'effecteur se retrouve au même point avec une micro-variation, on dit que le manipulateur est super répétable.

Il n'y a pas de méthode précise pour la mesure de la répétabilité. On peut trouver, comme un exemple, une méthode basée sur le système de l'interférométrie laser [49]. En fait, dans ce mémoire, pour calculer la répétabilité, on utilise la machine à mesures des coordonnées (XYZ) disponible au laboratoire de métrologie à l'UQTR (fig. 3.7). Cette machine sert,



en général, au contrôle dimensionnel et géométrique des pièces mécaniques. L'axe de la machine dispose d'un palpeur qui sert à la mesure de position en XYZ d'un point de la pièce qui est mise en son contact. L'enregistrement des coordonnées déterminées se fait à l'aide du logiciel GEOPAK.



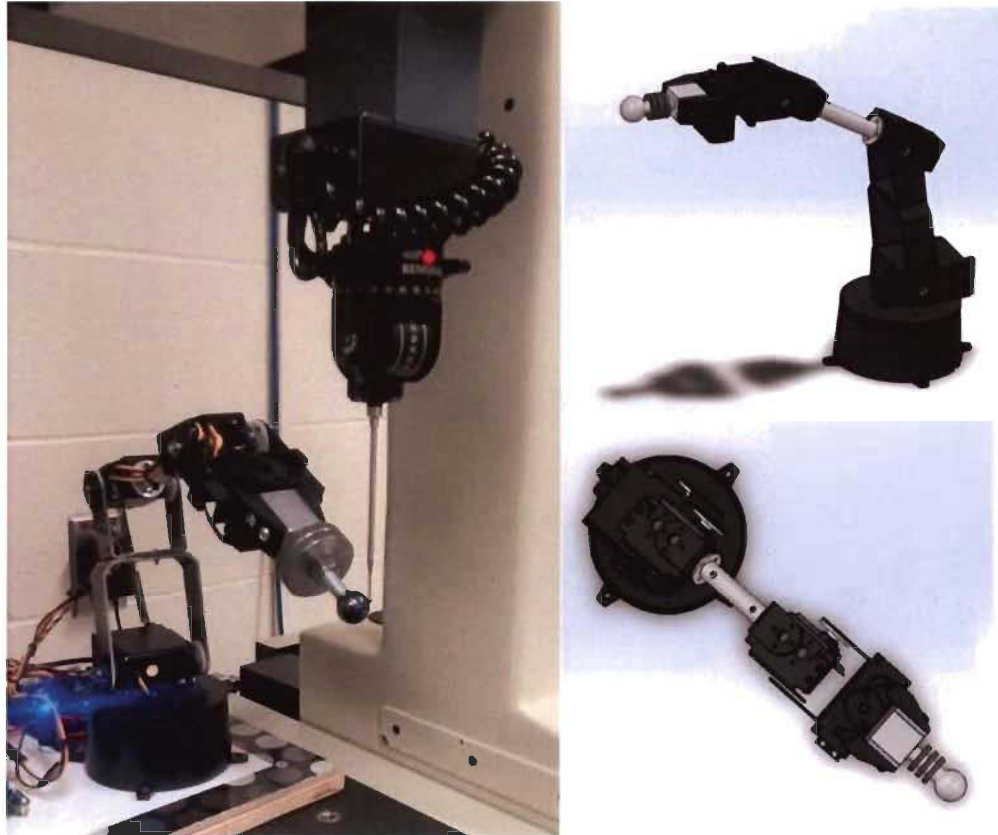
*Figure 3-7 : Machine de mesures des coordonnées [50]*

La manipulation passe par deux étapes importantes : l'étalonnage du palpeur et la définition de référence de la pièce. La première étape permet la reconnaissance du rayon de palpeur par GEOPARK afin de la soustraire dans une mesure palpée. L'étalonnage se fait à l'aide d'une sphère calibrée d'un diamètre connu où on prend cinq points, de sorte à conclure le diamètre du palpeur par l'écart entre la sphère calibrée d'un diamètre connu et celle de la touche mesurée.

La deuxième étape concerne la définition du repère de la pièce où on réfère les mesures d'un point palpé.

La technique consiste à mesurer le point central de la sphère déposée sur la pince du bras robotique en palpant cinq fois la sphère, en tentant de minimiser la différence maximale (erreur de forme) entre ces points afin d'avoir une mesure précise.

La mesure de la répétabilité est faite en fonction d'une charge variable attachée à l'effecteur (fig. 3.8). On effectue la mesure pour les quatre bras robotiques de différentes structures (métal, UDMAT, UD et MAT).



*Figure 3-8 : Bras robotique AL5B embarque une masse et une sphère à son OT*

On exécute la même trajectoire au minimum 25 fois. Pour chaque essai on prend les coordonnées de la position centrale de la sphère attachée à l'effecteur à son point d'arrivée. L'opération de la machine est faite manuellement en déplaçant le palpeur dans trois directions (x, y et z). Le calcul de la répétabilité utilise une méthode statistique pour mesurer la dispersion des points enregistrés (l'écart type) [51, 52].

# Chapitre 4 : Analyses par simulation

## dynamique du bras robotique

La première partie porte sur l'estimation de paramètres inertiels des éco-segments fabriqués. Ensuite, la deuxième partie présente les courbes de couples et de forces des articulations rotoïdes produites par la simulation. La dernière partie est consacrée à la comparaison des courbes de couples pour les quatre structures en fonction de la charge fixée sur l'effecteur du manipulateur.

### 4.1. Modélisation dynamique par la méthode de Newton-Euler

Le simulateur est basé principalement sur le block des équations dynamiques du manipulateur, et celui de la génération de trajectoire. Pour effectuer le calcul cinétique, il faut faire le calcul des paramètres cinématiques ( $\omega, \alpha, a$ ) en passant par une récurrence de la base vers la pince, puis une récurrence de la pince vers la base pour le calcul cinétique ( $F, \tau$ ). En fait, la mise en évidence du modèle dynamique du manipulateur en question, se fait sans rendre compte les facteurs physiques de perturbation : effets de frottement, efforts extérieurs, élasticité, les efforts exercés par l'effecteur. D'autre part, il faut décrire les équations dynamiques à partir des axes définis selon la convention de DH (fig. 4.1).



Figure 4-1 : Répartition des repères selon la convention de Denavit–Hartenberg [44]

*Tableau 4.1 : Paramètres de convention de DH*

Joint	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
1	$\theta_1$	0.0185m	0	$\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_2$	0	0.1191m	0
3	$\theta_3$	0	0.1210m	0
4	$\theta_4$	0	0.0865m	$-\frac{\pi}{2}$

#### 4.1.1 Récurrence de passe directe : calcul des grandeurs cinématiques

On part des conditions initiales nulles de la cinématique, soient :

$$\alpha_0 = \omega_0 = a_{e,0} = 0 \quad (4.1)$$

Où :

$\alpha_i$  : accélération angulaire du membre i

$\omega_i$  : vitesse angulaire du membre i

$a_{e,i}$  : accélération de l'extrémité du membre i

On décrit ensuite les vecteurs de gravités des quatre membrures, comme suit :

$$g_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$g_2 = \begin{bmatrix} -g \sin(q_2) \\ -g \cos(q_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$g_3 = \begin{bmatrix} -g \sin(q_3 + q_2) \\ -g \cos(q_3 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$g_4 = \begin{bmatrix} -g \sin(q_4 + q_3 + q_2) \\ -g \cos(q_4 + q_3 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Où :

$g_i$  : accélération gravitationnelle du membre i.

$q_i$  : position angulaire du joint i.

Pour passer d'un joint à l'autre, on utilise une composition de quatre transformations (4.6), dans l'ordre  $R_z, T_z, T_x, R_x$ .

$$A_i = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \quad (4.6)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Où,  $A_i$  est transformation totale entre deux joints.

Les variables  $\theta, d, a$  et  $\alpha$  sont définies par la convention de DH selon la construction du manipulateur (voir le tableau (4.1) ci-dessus)

Donc, par le passage d'un joint i-1 à l'autre i, on peut extraire les matrices de rotations  $A_i(3 \times 3) = R_{i-1}^i$  entre deux systèmes consécutifs.

On considère que les trajectoires des segments ( $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ ) qui impliquent le calcul des vitesses angulaires, sont connues. En partant de la base vers la pince, on produit les équations récursives de la vitesse angulaire totale du membre i (4.9), qui s'écrivent :

$$\omega_{i,tot} = (R_i^{i-1})^T * \omega_{i-1,tot} + (R_i^{i-1})^T * \omega_i \quad (4.9)$$

$$\omega_{1,tot} = (R_1^0)^T * \omega_{0,tot} + (R_1^0)^T * \omega_1 \quad (4.10)$$

$$\omega_{2,tot} = (R_2^1)^T * \omega_{1,tot} + (R_2^1)^T * \omega_2 \quad (4.11)$$

$$\omega_{3,tot} = (R_3^2)^T * \omega_{2,tot} + (R_3^2)^T * \omega_3 \quad (4.12)$$

$$\omega_{4,tot} = (R_4^3)^T * \omega_{3,tot} + (R_4^3)^T * \omega_4 \quad (4.13)$$

Où :

$$R_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$(R_i^{i-1})^T$  : Transposée de la matrice de rotation.

Tel que :

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\omega_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Pour les accélérations, on prend en considération deux composantes : tangente et normale.

$$\alpha_{i,tot} = \alpha_{i,t,tot} + \alpha_{i,n,tot} \quad (4.19)$$

- Accélération totale tangente du membre i :

$$\alpha_{i,t,tot} = (R_i^{i-1})^T * \alpha_{i-1,t,tot} + (R_i^{i-1})^T * \alpha_{i,t} \quad (4.20)$$

$$\alpha_{1,t,tot} = (R_1^0)^T * \alpha_{0,t,tot} + (R_1^0)^T * \alpha_{1,t} \quad (4.21)$$

$$\alpha_{2,t,tot} = (R_2^1)^T * \alpha_{1,t,tot} + (R_2^1)^T * \alpha_{2,t} \quad (4.22)$$

$$\alpha_{3,t,tot} = (R_3^2)^T * \alpha_{2,t,tot} + (R_3^2)^T * \alpha_{3,t} \quad (4.23)$$

$$\alpha_{4,t,tot} = (R_4^3)^T * \alpha_{3,t,tot} + (R_4^3)^T * \alpha_{4,t} \quad (4.24)$$

Tel que :

$$\alpha_{1,t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\alpha_{2,t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\alpha_{3,t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$\alpha_{4,t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

- Accélération totale normale du membre i :

$$\alpha_{i,n,tot} = ((R_i^{i-1})^T * \omega_i) \times \omega_{i,tot} \quad (4.29)$$

$$\alpha_{1,n,tot} = ((R_1^0)^T * \omega_1) \times \omega_{1,tot} \quad (4.30)$$

$$\alpha_{2,n,tot} = ((R_2^1)^T * \omega_2) \times \omega_{2,tot} \quad (4.31)$$

$$\alpha_{3,n,tot} = ((R_3^2)^T * \omega_3) \times \omega_{3,tot} \quad (4.32)$$

$$\alpha_{4,n,tot} = ((R_4^3)^T * \omega_4) \times \omega_{4,tot} \quad (4.33)$$

Selon la formule de l'accélération, on calcule l'accélération de l'extrémité et du centre de masse d'un membre i :

$$a_{e,i} = (R_i^{i-1})^T * a_{e,i-1} + \alpha_{itot} \times ((R_i^{i-1})^T * r_{i,i+1}) + \omega_{itot} \times (\omega_{itot} \times [(R_i^{i-1})^T * r_{i,i+1}]) \quad (4.34)$$

Où :

$a_{e,i}$  : accélération de l'extrémité du membre i.

$r_{i,i+1}$  : vecteur allant du joint i au joint i+1 (de  $O_{i-1}$  à  $O_i$ ).

Ensuite, on ramène les accélérations aux centres de masses :

$$\bar{a}_i = (R_i^{i-1})^T * a_{e,i-1} + \alpha_{itot} \times ((R_i^{i-1})^T * r_{i,ci}) + \omega_{itot} \times (\omega_{itot} \times [(R_i^{i-1})^T * r_{i,ci}]) \quad (4.35)$$

Où :

$\bar{a}_i$  : accélération du centre de masse du membre i.

$r_{i,ci}$  : vecteur allant du joint i au centre de masse du membre i (de  $O_i$  à  $O_c$ )

#### 4.1.2 Récurrence de passe inverse : calcul des grandeurs cinétiques

Une fois les paramètres cinématiques calculés pour chaque membre, on peut faire le calcul cinétique en commençant par la quatrième membrure (poignet).

- Force exercée par le membre i+1 sur le membre i :

$$f_i - m_i \bar{a}_i - R_i^{i+1} * f_{i+1} + m_i g_i = 0 \quad (4.36)$$

$$f_4 + m_4 g_4 = m_4 \bar{a}_4 \quad (4.37)$$

$$f_3 = m_3 \bar{a}_3 + R_3^4 * f_4 - m_3 g_3 \quad (4.38)$$

$$f_2 = m_2 \bar{a}_2 + R_2^3 * f_3 - m_2 g_2 \quad (4.39)$$

$$f_1 = m_1 \bar{a}_1 + R_1^2 * f_2 - m_1 g_1 \quad (4.40)$$



Où :

$f_i$  : force exercée par le membre i-1 sur le membre i.

$m_i$  : masse du membre i.

- Couple exercé par le membre i+1 sur le membre i :

$$\tau_i - \bar{I}_i * \alpha_i - \omega_i \times (\bar{I}_i * \omega_i) - R_i^{i+1} \tau_{i+1} + f_i \times r_{i,ci} - (R_i^{i+1} * f_{i+1}) \times r_{i+1,ci} = 0 \quad (4.41)$$

$$\tau_4 = \bar{I}_4 * \alpha_4 + \omega_4 \times (\bar{I}_4 * \omega_4) - f_4 \times r_{4,c4} \quad (4.42)$$

$$\tau_3 = \bar{I}_3 * \alpha_3 + \omega_3 \times (\bar{I}_3 * \omega_3) + (R_3^4 \tau_4 - f_3 \times r_{3,c3} + (R_3^4 * f_4) \times r_{4,c3}) \quad (4.43)$$

$$\tau_2 = \bar{I}_2 * \alpha_2 + \omega_2 \times (\bar{I}_2 * \omega_2) + (R_2^3 \tau_3 - f_2 \times r_{2,c2} + (R_2^3 * f_3) \times r_{3,c2}) \quad (4.44)$$

$$\tau_1 = \bar{I}_1 * \alpha_1 + \omega_1 \times (\bar{I}_1 * \omega_1) + (R_1^2 \tau_2 - f_1 \times r_{1,c1} + (R_1^2 * f_2) \times r_{2,c1}) \quad (4.44)$$

Où :

$\tau_i$  : moment (torque) exercé par le membre i-1 sur le membre i.

$\bar{I}_i$  : matrice d'inertie centroïdale 3x3 du membre i (système  $O_c$  parallèle à  $O_i$  ).

Avec toutes les grandeurs calculées, on obtient le système d'équations qui décrit les couples nécessaires pour que l'effecteur suive une trajectoire spécifiée.

## 4.2. Génération de la trajectoire

Le générateur de la trajectoire fonctionne selon la loi du trapèze de façon à mener l'effecteur d'un point  $A(x_i, y_i, z_i)$  vers le point  $B(x_f, y_f, z_f)$  pendant un temps  $t_{AB}$ . [53, 54]

Ce déplacement se fait par les rotations de joints articulaires du bras en donnant l'angle de départ et d'arrivée à chaque actionneur, avec une vitesse et une accélération maximales (tab. 4.2).

En fait, la trajectoire du manipulateur est divisée en trois intervalles de temps  $[t_0, t_1]$ ,  $[t_1, t_2]$  et  $[t_2, t_3]$  (fig. 4.2). Il se peut arriver que le mouvement soit court pour atteindre  $\omega_m$ , donc on divisera la trajectoire en deux intervalles égaux  $[t_0, t_1]$  et  $[t_1, t_f]$ , tel que :  $t_1 = \frac{1}{2} t_f$ .

Le mouvement des joints est synchronisé avec celui qui prendra le plus de temps de manière à ce que tous les membres commencent et terminent en même temps. Il s'agit du principe de l'interpolation joint pour la planification d'une trajectoire.

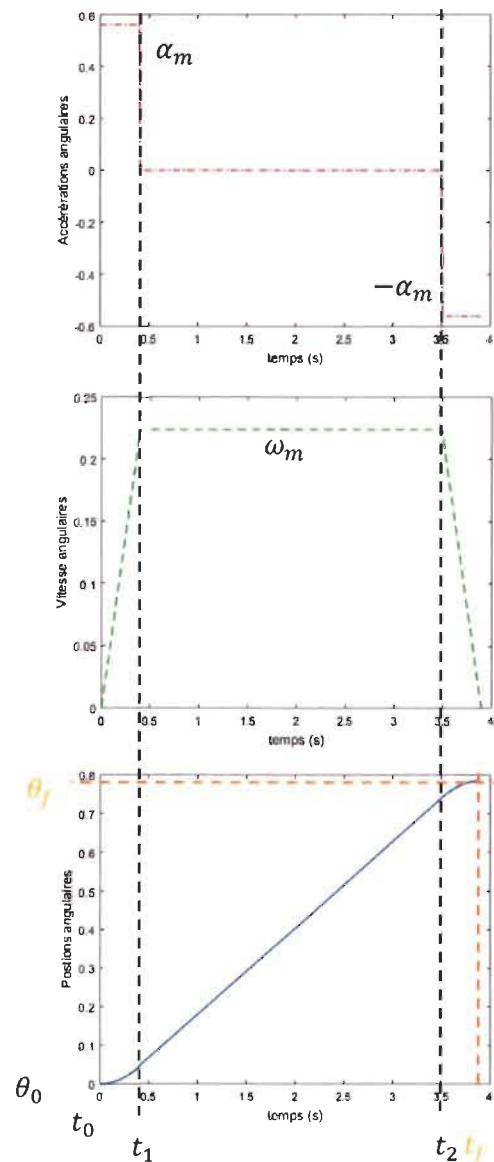


Figure 4-2 : Principe d'interpolation joint pour un mouvement trapèze en vitesse

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Zone 1 : } \theta(t) = \frac{\alpha_m}{2} t^2, \theta_1(t) = \frac{\alpha_m}{2} t_1^2, \omega_m = \alpha_m t_1 \\ \text{Zone 2 : } \theta(t) = \theta_1 + \omega_m(t - t_1), \theta_2 = \theta_1 + \omega_m(t_2 - t_1) \\ \text{Zone 3 : } \theta(t) = \theta_2 + \omega_m(t - t_1) - \frac{\alpha_m(t - t_2)^2}{2} \end{array} \right.$$

Tel que :

$$t_2 = \frac{\theta_f}{\omega_m} \quad (4.46)$$

$$t_1 = \frac{\omega_m}{\alpha_m} \quad (4.47)$$

$$t_f = t_1 + t_2 \quad (4.48)$$

Où :

$\theta_f$  : position angulaire finale ( $^\circ/s^2$ )

$\omega_m$  : vitesse angulaire maximale ( $^\circ/s$ )

$\alpha_m$  : accélération angulaire maximale ( $^\circ/s^2$ )

On s'intéresse particulièrement à la dynamique du bras en fonction d'une charge portée par son organe terminal, sans tenir compte d'une source de perturbation qui peut erroner la position de l'effecteur désirée. La même trajectoire a été répétée pour les quatre structures (Métal, UDMAT, UD et MAT) (fig. 4.3).

**Tableau 4.2** : Consignes pour la génération de trajectoire

Joint i	$\theta_i$	$\theta_f$	$\omega_i(^\circ/s)$	$\omega_m(^\circ/s)$	$\alpha_m(^\circ/s^2)$
Hanche	0°	45°	0	20	50
Épaule	0°	90°	0	20	50
Coude	0°	25°	0	20	50
Poignet	0°	20°	0	20	50

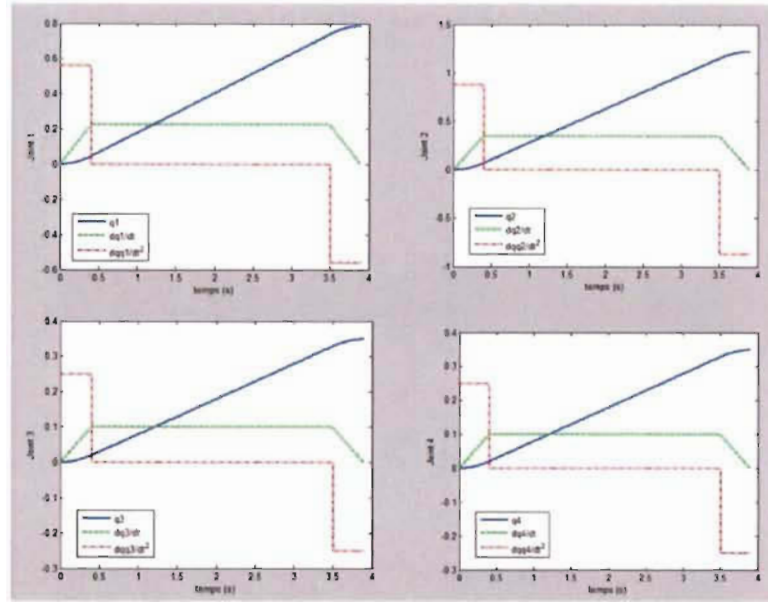


Figure 4-3 : Génération de trajectoire des quatre joints rotoïdes

### 4.3. Identification hors-ligne des paramètres inertiels

L'utilisation des équations de *Newton\_Euler* présentées en section 4.1 demande une connaissance de la masse, d'une part, et de la matrice d'inertie centroïdale, d'autre part, de chaque membre du robot. Rappelons que la masse représente la résistance aux variations de translation dans les équations de force et que la matrice d'inertie représente la résistance à la rotation autour d'un axe fixe dans les équations de couple [39, 42]. Avant de procéder à l'estimation des paramètres dynamiques, il est primordial de bien définir les repères des segments selon la convention de DH sur le modèle CAO du manipulateur, pour que les paramètres identifiés soient alignés à ces repères et que le résultat du calcul cinématique soit correct. Les tableaux ci-dessous présentent les quatre assemblages (voir fig. 3.3) qu'on a choisis adéquatement pour identifier leurs propriétés de masse. Le deuxième assemblage représente la membrure choisie pour la fabrication des éco-composites, en identifiant ses paramètres inertiels à chaque changement de matériau. Cet assemblage admet seulement un plan de symétrie de sorte que  $M_{xy} = 0$ ,  $M_{yz} = 0$  (produit d'inertie) tel que l'axe  $\overrightarrow{OY}$  est l'axe principal de l'inertie. Le quatrième

assemblage constitue le segment de l'effecteur du bras où on attache la charge d'une masse variable à son extrémité. Il est nécessaire d'identifier les paramètres inertiels d'un tel segment dans chaque changement de charge.

**Tableau 4.3 : Paramètres dynamiques estimés pour la hanche et le coude**

Paramètres	Unités	Assemblage 1 : hanche	Assemblage 3 : coude
Matrice d'inertie	$g \cdot mm^2$	$\begin{bmatrix} 72230.13 & -1701.44 & -84.44 \\ -1701.44 & 57373.41 & 5329.79 \\ -84.44 & 5329.79 & 95569.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 26505.22 & 807.43 & 25889.66 \\ 807.43 & 527126.56 & 1304.21 \\ 25889.66 & 1304.21 & 515531.07 \end{bmatrix}$
Masse	$g$	137,38	146,82
Volume	$mm^3$	116269.67	61611.53
CG	$mm$	$\begin{bmatrix} -2.70 \\ 13.66 \\ 13.70 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 47.25 \\ -2.01 \\ -22.44 \end{bmatrix}$
Longueur		18.49	120.95
$r_{(i,i+1)}$		$\begin{bmatrix} 30.15 \\ 4.63 \\ 18.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 120.95 \\ 0.64 \\ 0 \end{bmatrix}$
$r_{(i,ci)}$		$\begin{bmatrix} 2.97 \\ 13.91 \\ 13.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 47.25 \\ 2 \\ 22.43 \end{bmatrix}$
$r_{(i+1,ci)}$		$\begin{bmatrix} 33.12 \\ 9.28 \\ 4.68 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 73.70 \\ 2.64 \\ 22.43 \end{bmatrix}$

**Tableau 4.4 : Paramètres dynamiques estimés pour le poignet**

Paramètres	Unités	Assemblage 4 : poignet		
		0g	100 g	200 g
Matrice d'inertie	$g \cdot mm^2$	$\begin{bmatrix} 29706.59 & 951.63 & -2148.95 \\ 951.63 & 46147.97 & -2529.08 \\ -2148.95 & -2529.08 & 33522.80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 40433.22 & -5332.81 & 916.94 \\ -5332.81 & 100017.78 & -2984.73 \\ 916.94 & -2984.73 & 84550.63 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 50334.23 & -7133.53 & 1795.43 \\ -7133.53 & 123559.20 & -3115.29 \\ 1795.43 & -3115.29 & 104742.94 \end{bmatrix}$
Masse	$g$	80.32	180.32	280.32
Volume	$mm^3$	39359.40	52154.76	52154.76
CG	$mm$	$\begin{bmatrix} 43.04 \\ 4.88 \\ -26.73 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 60.13 \\ 2.34 \\ -25.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 65.02 \\ 1.62 \\ -25.13 \end{bmatrix}$
Long.		86.5	86.5	86.5
$r_{(i,i+1)}$		-	-	-
$r_{(i,ci)}$		$\begin{bmatrix} 43.04 \\ 4.89 \\ 26.73 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 60.12 \\ 2.35 \\ 25.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 65.02 \\ 1.62 \\ 25.14 \end{bmatrix}$
$r_{(i+1,ci)}$		-	-	-

**Tableau 4.5 : Paramètres dynamiques estimés pour l'épaule avec quatre structures différentes**

Param.	Uni.	Assemblage 2 : épaule			
		Métal	UDMAT	UD	MAT
Matrice d'inertie	$g \cdot mm^2$	$\begin{bmatrix} 36873.91 & 0 & 1610.04 \\ 0 & 118012.10 & 0 \\ 1610.04 & 0 & 85718.68 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 27754.97 & 0 & 1877.33 \\ 0 & 97049.28 & 0 \\ 1877.33 & 0 & 72804.74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 24969 & 0 & 1399 \\ 0 & 87858.33 & 0 \\ 1399 & 0 & 66010.31 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 22410.62 & 0 & 1624.64 \\ 0 & 83191.34 & 0 \\ 1624.64 & 0 & 63514.6 \end{bmatrix}$
Masse	$g$	47.71	37.12	33.26	29.51
Volume	$mm^3$	20720.80	27642.51	24944.86	21952.71
CG	$mm$	$\begin{bmatrix} 62.43 \\ 0 \\ -35.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 62.43 \\ 0 \\ -35.05 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 61.56 \\ 0 \\ -36.14 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 62.97 \\ 0 \\ -37.07 \end{bmatrix}$
Long.		119.08	119.08	119.08	119.08
$r_{(i,i+1)}$		$\begin{bmatrix} 119.08 \\ 0 \\ 7.10 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 119.08 \\ 0 \\ 6.85 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 119.08 \\ 0 \\ 7.11 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 119.08 \\ 0 \\ 7.49 \end{bmatrix}$
$r_{(i,ci)}$		$\begin{bmatrix} 62.43 \\ 0 \\ 35.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 62.44 \\ 0 \\ 35.05 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 61.56 \\ 0 \\ 36.14 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 62.97 \\ 0 \\ 37.06 \end{bmatrix}$
$r_{(i+1,ci)}$		$\begin{bmatrix} 56.65 \\ 0 \\ 27.91 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 56.65 \\ 0 \\ 28.20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 57.52 \\ 0 \\ 29.03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 56.11 \\ 0 \\ 29.57 \end{bmatrix}$

Où :  $r_{(i,i+1)}$  : Vecteur allant du joint i au joint i+1.

$r_{(i,ci)}$  : Vecteur allant du joint i au centre de masse du membre i.

#### 4.4. Calcul théorique des couples des actionneurs

A partir des consignes articulaires d'une trajectoire désirée par l'utilisateur (tab. 4.2), le simulateur génère les couples nécessaires pour le suivi de cette trajectoire, ainsi que des forces de soumission et de réaction entre les membrures du bras robotique, selon la loi de Newton.

Pour la totalité de la trajectoire, on fait saisir la moyenne de couples calculés, en fonction de deux variances considérées dans l'étude afin d'évaluer la dynamique du manipulateur robotique : une charge variable et une structure variable. Le tableau ci-dessous (tab. 4.6) présente le résultat de la simulation pour des différents membres épaule-coude du bras robotique en fonction de la charge. Tous les axes des actionneurs sont alignés en  $\vec{z}$ . Les autres composantes (en x et y) de couple ne sont pas nulles à cause de la structure spatiale du manipulateur et des produits d'inertie des segments du bras.

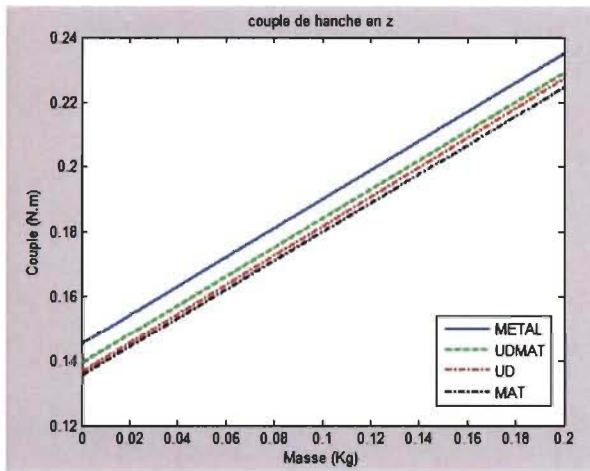
**Tableau 4.6 : Couples des actionneurs des différents membres en fonction de la charge**

Couples (N.m)		Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)		
axe	Matériau		0	0.1	0.2		0	0.1	0.2		0	0.1	0.2		0	0.1	0.2
			m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3
$\vec{x}$	Métal	Hanche	0,0431	0,0755	0,1042	Épaule	0,0595	0,0772	0,1035	Coude	0,037	0,050	0,068	Poignet	0,0117	0,0253	0,0388
	UDMAT		0,0417	0,0736	0,1024		0,0567	0,0749	0,1013		0,037	0,050	0,068		0,0117	0,0253	0,0388
	UD		0,0407	0,0721	0,1000		0,0563	0,0747	0,1011		0,037	0,050	0,068		0,0117	0,0253	0,0388
	MAT		0,0416	0,0741	0,1034		0,0558	0,0745	0,1010		0,037	0,050	0,068		0,0117	0,0253	0,0388
$\vec{y}$	Métal	Hanche	0,0798	0,1132	0,1513	Épaule	0,0190	0,0427	0,0550	Coude	0,011	0,031	0,053	Poignet	0,0141	0,0303	0,0463
	UDMAT		0,0760	0,1101	0,1483		0,0169	0,0408	0,0534		0,011	0,031	0,053		0,0141	0,0303	0,0463
	UD		0,0756	0,1103	0,1490		0,0168	0,0403	0,0521		0,011	0,031	0,053		0,0141	0,0303	0,0463
	MAT		0,0746	0,1090	0,1473		0,0168	0,0414	0,0548		0,011	0,031	0,053		0,0141	0,0303	0,0463
$\vec{z}$	Métal	Hanche	0,1454	0,1904	0,2352	Épaule	0,0975	0,1197	0,1417	Coude	0,061	0,081	0,100	Poignet	0,0419	0,0609	0,1017
	UDMAT		0,1395	0,1844	0,2292		0,0926	0,1148	0,1368		0,061	0,081	0,100		0,0419	0,0609	0,1017
	UD		0,1365	0,1820	0,2274		0,0900	0,1127	0,1353		0,061	0,081	0,100		0,0419	0,0609	0,1017
	MAT		0,1357	0,1803	0,2248		0,0896	0,1114	0,1331		0,061	0,081	0,100		0,0419	0,0609	0,1017

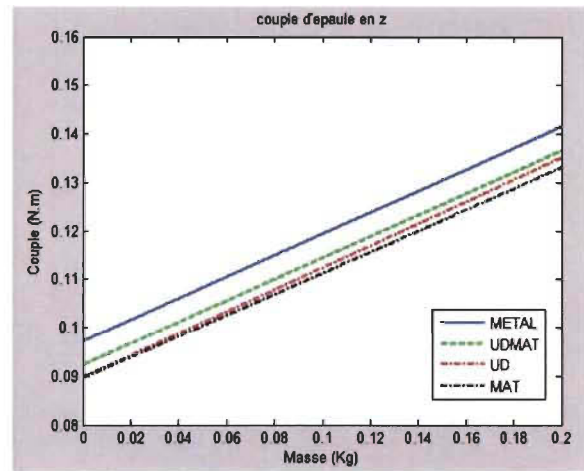
Pour toutes les structures (*MÉTAL-UDMAT-UD-MAT*), les résultats illustrés dans le tableau (tab. 4.6) montrent que la valeur moyenne des couples des actionneurs augmente avec la charge. Cela apparaît logique du point de vue cinétique d'un corps rigide. Cependant, les deux joints coude et poignet situés après la structure éco-composite, produisent toujours la même valeur de couple pour les quatre structures différentes. Théoriquement, il est raisonnable d'avoir la même valeur de couple pour les joints qui suivent l'éco-segment, puisque le calcul des couples passe du joint de poignet vers celui de la hanche qui soulève l'ensemble du bras, donc le calcul des couples du coude et du

poignet, selon la méthode de Newton Euler, sont insensibles aux variations de masse et d'inertie des quatre variantes de l'épaule.

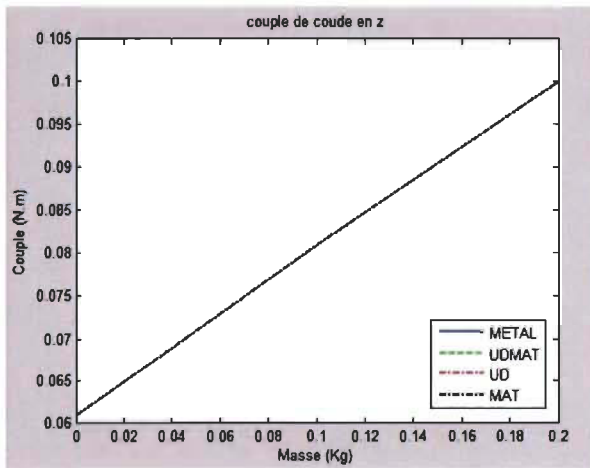
Les courbes de couple principal (en z) pour chaque structure et chaque charge sont présentées à la fig. 4.4. On voit bien l'augmentation du couple de l'actuateur avec une plus grande charge portée par la pince du manipulateur. Les courbes de couples sont assez proches, ce qui est dû aux paramètres géométriques et à la masse qui sont elles aussi assez proches.



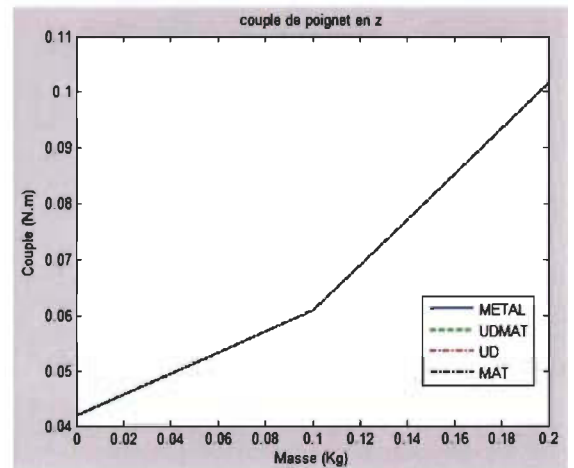
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4-4 : Couples de différents actionneurs du bras en z pour les différentes structures, (a) : Hanche, (b) : Épaule, (c) : Coude, (d) : Poignet



## 4.5. Calcul théorique de l'énergie dissipée par les actionneurs

A partir du résultat précédent, il est possible de calculer l'énergie dissipée par chaque actionneur pendant le mouvement du bras, en sommant la multiplication de la vitesse angulaire et du couple pendant  $\Delta t$  sur l'axe de mouvement,  $\vec{z}$  dans ce cas.

$$E = \sum \tau_z \omega_z \Delta t \quad (4.49)$$

Où  $\tau_z$  : Couple en  $\vec{z}$  (N.m)

$\omega_z$  : Vitesse angulaire (rad/s)

$\Delta t$  : Écart du temps entre deux points de trajectoire (s)

De même que pour les couples, on a tenté de comparer la variation de l'énergie cumulée des différentes structures, en fonction de la charge. Le tableau ci-dessous (tab. 4.7) présente le résultat de la comparaison du calcul d'énergie sur l'axe principal de mouvement  $\vec{z}$ .

**Tableau 4.7 : Énergie cumulée pour les différentes structures en fonction de la charge**

Énergie cumulée (J)		Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)						
			0	0.1	0.2				0		0.1	0.2			0	0.1	0.2
axe	Matériau		m1	m2	m3				m1		m2	m3			m1	m2	m3
z	Métal	Hanche	0,1187	0,1557	0,1925	Épaule	0,1226	0,1508	0,1788	Coude	0,0218	0,0288	0,0358	Poignet	0,0151	0,0210	0,0350
	UDMAT		0,1139	0,1509	0,1877		0,1165	0,1447	0,1727		0,0218	0,0288	0,0358		0,0151	0,0210	0,0350
	UD		0,1115	0,1490	0,1862		0,1133	0,1422	0,1709		0,0218	0,0288	0,0358		0,0151	0,0210	0,0350
	MAT		0,1109	0,1476	0,1842		0,1128	0,1406	0,1682		0,0218	0,0288	0,0358		0,0151	0,0210	0,0350

On remarque que l'énergie diminue avec le poids, une déduction bien connue en matière d'énergie pour un solide indéformable. De même que le résultat obtenu pour les couples, les deux derniers actionneurs du manipulateur ne montrent pas de différence d'énergie dissipée lors du mouvement.

Le tableau (4.8) représente la baisse d'énergie en % par rapport à celle consommée par le squelette en Métal.

**Tableau 4.8 : Diminution en % de l'énergie cumulée des éco-segments par rapport au Métal**

Différence d'énergie en %			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)		
				0	0.1	0.2		0	0.1	0.2
axe	$\Delta m$ %	Matériau		m1	m2	m3		m1	m2	m3
$\vec{z}$	-22.2	UDMAT	Hanche	4,04%	3,08%	2,49%	Épaule	4,98%	4,05%	3,41%
	-30.3	UD		6,07%	4,30%	3,27%		7,59%	5,70%	4,42%
	-38.15	MAT		6,57%	5,20%	4,31%		7,99%	6,76%	5,93%

La diminution d'énergie dépend du poids attaché à la pince du bras : plus la masse est faible et plus l'écart est important. Il apparaît que l'écart est intéressant au niveau de la structure en MAT par rapport aux autres.

Le tableau (4.10) ci-dessous représentent la comparaison de l'efficacité énergétique dans laquelle on affecte le paramètre de masse de la structure. D'abord, on calcule les écarts d'énergies qui correspondent à  $\Delta m$  de chaque de éco-segment (tab. 4.9).

$$\Delta m_i \% = \frac{masse_{METAL} - masse_{ECO_i}}{masse_{METAL}} \quad (4.50)$$

Où  $\Delta m$  : est écart entre la masse de la structure en Métal et celle en éco-composite.

**Tableau 4.9 : Écart entre l'énergie cumulée des éco-segment et le segment en Métal**

Différence d'énergie (J)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)		
				0	0.1	0.2		0	0.1	0.2
axe	$\Delta m$ (g)	Matériau		m1	m2	m3		m1	m2	m3
$\vec{z}$	10,6	UDMAT	Hanche	0,0048	0,0048	0,0048	Épaule	0,0061	0,0061	0,0061
	14,5	UD		0,0072	0,0067	0,0063		0,0054	0,0086	0,0079
	18,2	MAT		0,0078	0,0081	0,0083		0,0059	0,0102	0,0106

Le tableau ci-dessus (4.9) montre le calcul de l'écart de la masse et l'énergie cumulée par rapport à celles du segment en métal. Cela dans le but de faire la comparaison énergétique entre les différents segments en éco-composite et de mettre en évidence celui qui est le plus efficace en terme de l'énergie. Le tableau (4.10) est utilisé dans la suite, pour effectuer le calcul d'écart d'énergie entre les éco-segments dans lequel  $\Delta m$  est uniforme. Cette normalisation se fait comme suit :

$$\text{écart d'énergie normalisée}_i = \frac{\text{écart d'énergie}_i \times \Delta \text{masse}_{MAT}}{\Delta \text{masse}_i} \quad (4.51)$$

Par exemple, la première entrée dans le tableau (4.10) est obtenue comme suit :

$$0.0082(J) = \frac{0.0048(J) \times 18.2(g)}{10.6(g)} \quad (4.52)$$

**Tableau 4.10 :** Écart de l'énergie cumulée en % des éco-segment pour la même masse  $\Delta m$

Différence d'énergie en %			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en Kg)		
				0	0.1	0.2		0	0.1	0.2
axe	$\Delta m$ (g)	Matériau		m1	m2	m3		m1	m2	m3
$\vec{z}$	18,2	UDMAT	Hanche	0,82%	0,82%	0,82%	Épaule	1,05%	1,05%	1,05%
	18,2	UD		0,91%	0,84%	0,79%		0,68%	1,08%	1,00%
	18,2	MAT		0,78%	0,81%	0,83%		0,59%	1,02%	1,06%

En ramenant UDMAT et UD à la même valeur de  $\Delta m$  que la structure en MAT, on peut comparer les pourcentages de l'énergie cumulée des trois structures en tenant compte de l'influence de la masse. Le résultat est montré dans le tableau (4.10). La structure UDMAT est avantageuse. Elle présente une stabilité dans la consommation de l'énergie par rapport au MÉTAL avec un écart plus intéressant que des autres structures (UD et MAT). Cela s'explique par l'influence probable de la géométrie dans le calcul de la consommation de l'énergie. Ainsi, une partie de l'énergie est dissipée à cause de la géométrie de la structure

MAT (plus mince). Toutefois, on ne peut pas prévoir le phénomène sans prise en considération du paramètre de poids dans cette comparaison.

## **4.6. Conclusions**

Une étude comparative des performances dynamiques de deux types de bras robotisés a été présentée dans ce chapitre. Le premier robot (original) est en métal. Un autre robot avec l'articulation de l'épaule remplacé par un matériau CFN a été utilisé, avec trois structures différentes : UD, MAT et UDMAT.

Les paramètres inertiels du manipulateur ont été obtenus à partir d'un modèle CAO 3D. La précision de cette méthode est affectée par le niveau de détail du modèle 3D. Dans ce cas, le modèle était quelque peu imprécis puisque tous les composants du bras robotique n'étaient pas considérés (circuits, vis, fils, etc.). En outre, les perturbations physiques telles que les vibrations, qui peuvent être causées par une mauvaise répartition du matériau par rapport à l'axe de rotation, n'ont pas été modélisées. Le véritable comportement dynamique du bras n'a donc pas été obtenu, cependant la méthode utilisée a fourni quand même des estimations admissibles.

La simulation dynamique a donné une bonne idée de la performance fonctionnelle d'une structure éco-composite par rapport au métal. Les résultats de la simulation fournissent une bonne prévision de l'efficacité de l'utilisation de l'éco-segment dans le système actuel.

En outre, il a été constaté que le segment MAT montre une instabilité énergétique malgré son faible poids. Cela résulte de sa géométrie qui provoque une dissipation remarquable d'énergie dans le cas d'une charge lourde. La géométrie de la structure MAT conduit probablement à une déformation élastique du matériau. Une démonstration expérimentale de ce phénomène est fortement recommandée.

On a constaté que la structure UDMAT représente de bonnes propriétés inertielles et elle réduit tant le couple que l'énergie comparativement au métal. On obtient une diminution

de 5% de l'énergie, ce qui correspond à 22% moins de poids que la structure métallique. Ce résultat est tout à fait acceptable en comparant avec les performances connues d'un alliage d'aluminium compte tenu du facteur de précision dans la fabrication des segments émulsés par rapport à celui du métal. Ce pourcentage d'énergie peut être inférieur ou supérieure selon le type de trajectoire.

Également, la structure UD présente une diminution d'énergie entre 7% et 3% pour une charge élevée par rapport au métal. Comme la différence de poids est de -30% par rapport à la structure métallique, la structure UD présente le meilleur compromis poids-énergie par rapport aux autres éco-structures. Davantage de travail est nécessaire pour déterminer les avantages et les inconvénients de l'utilisation de matériaux éco dans la conception de BR mobiles pour VEs.

Pour la simulation, d'autres joints métalliques pourraient être remplacés et un robot tout-CFN pourrait être conçu. L'optimisation topologique (formes et tailles) des éco-segments pourrait influencer positivement la dynamique du bras. En plus, dans cette étude, une seule trajectoire a été simulée. Différentes trajectoires pourraient être utilisées pour mesurer les avantages par rapport aux couples individuels et /ou à l'énergie cumulative.

Le compromis entre les économies d'énergie et la répétabilité des mouvements pourrait également être étudié, car l'éco-robot est susceptible d'être moins rigide que son équivalent métallique (chapitre suivant).

Enfin, comme la membrure du robot qui a été remplacée dans cette étude a été effectivement fabriquée, la prochaine étape consiste à valider les résultats de la simulation avec des expériences réelles (chapitre suivant).

# Chapitre 5 : Expérimentations

## 5.1. Mesure expérimentale d'énergie consommée par les actionneurs

À la suite de la mise en évidence théorique de l'efficacité énergétique des différents éco-segments par rapport au segment en métal, un essai expérimental est présenté dans cette section. Il s'agit de mesurer l'énergie cumulative des actionneurs du bras tout au long d'une trajectoire. Comme pour la simulation, une trajectoire spécifiée excitant tous les actionneurs, est choisie pour l'essai. La trajectoire du manipulateur est générée à l'aide de la plateforme *FlowStudio* fournie avec le bras AL5B. Tel que décrit ci-dessus (fig. 3.6), on utilise la carte d'*Arduino* pour l'acquisition des signaux analogiques sortants des capteurs de courant (*ACS712*).

Le mouvement du manipulateur est effectué au minimum 15 fois en mesurant l'intensité de courant ( $i_c$ ) de sortie d'alimentation de servomoteurs à chaque instant de la trajectoire. À partir de cette mesure, on calcule la quantité d'énergie d'actionneur fournie durant une période de temps (puissance électrique). Elle est obtenue en pondérant la différence de potentiel acquise (fixée à 5 volts) et l'intensité de courant mesurée ( $i_c$ ), dans le but de calculer finalement l'énergie cumulée pour chaque actionneur. On répète ce calcul pour chacune des 15 exécutions de trajectoire. Par la suite, on calcule la moyenne des énergies cumulées saisies pendant les essais.

La mesure de l'énergie consommée est faite en fonction d'une charge attachée à l'effecteur. Cela dans le but d'évaluer la capacité des éco-segments à remplir la fonction du manipulateur pendant son exécution sans perturbation. (voir l'annexe 6)

L'énergie cumulée est calculée en sommant la multiplication de la tension d'alimentation fixé à 5V et l'intensité de courant mesurée d'actionneur pondéré par  $\Delta t$ .

$$E_c = \sum P_{elc} \cdot \Delta t = \sum v_a \cdot i_a \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

Où :

$E_c$  : Énergie cumulée (J)

$P_{elc}$  : Puissance électrique (W)

$\Delta t$  : Écart du temps entre deux points de trajectoire (s)

$v_a$  : Tension d'alimentation d'actionneur (5v)

$i_a$  : Courant d'alimentation d'actionneur mesuré (A)

Le tableau (5.1) ci-dessous représente le résultat de mesure de l'énergie cumulée pour les quatre actionneurs du bras en fonction de la charge.

**Tableau 5.1 : Expérimentation : ÉC des différentes structures en fonction de la charge**

Moyenne ÉC (J)	Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)		
		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08
Matériau		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3
Métal	Hanche	9,64	11,66	14,98	Épaule	16,77	40,62	63,88	Coude	19,86	44,46	78,97	Poignet	16,94	32,49	47,88
UDMAT		9,14	11,37	14,62		10,45	36,48	63,82		18,40	45,25	77,01		17,12	32,93	49,65
UD		8,39	10,73	14,21		9,80	34,37	60,66		16,43	40,12	76,01		14,52	29,39	46,20
MAT		8,12	11,10	13,75		9,03	30,26	64,26		11,80	38,75	75,14		13,89	28,99	46,84

Pour les quatre structures, les résultats montrent une augmentation de l'énergie proportionnelle à la masse de la charge portée. UDMAT est la structure qui s'approche le plus de celle en métal puis UD et MAT respectivement. Cet ordre est le même pour leurs masses. Cependant, la structure en MAT montre une instabilité de l'énergie mesurée

surtout à la dernière charge plus pesante. Cela provient de sa faible rigidité qui entraîne en conséquence une accumulation de l'énergie potentielle élastique (la déformation élastique).

À la différence de la simulation, le coude et le poignet ne montrent pas la même consommation de l'énergie dans les différents éco-segments. Cela peut être expliqué par les perturbations physiques négligées (vibration, frottement entre les connecteurs mécaniques, etc.), comme le modèle dans la simulation est infidèle au système réel, par ailleurs, les trajectoires ne sont pas comparables, ce qui explique la différence entre les valeurs d'accumulation d'énergie dans l'expérimentale et la simulation. En revanche, le résultat expérimental peut confirmer celui ressorti de la simulation, à propos de l'efficacité énergétique des éco-segments par rapport au celui en métal.

De la même manière que pour la simulation, on essaie maintenant de démontrer les avantages énergétiques de l'éco-structure.

*Tableau 5.2 : Expérimentation : Baisse de l'énergie en % des éco-segments par rapport au Métal*

Moyenne EC en %		Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)		
			0	107.66	209.08		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08
Matériau	$\Delta m$ %		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3
UDMAT	-22.2	Hanche	5,1%	2,5%	2,4%	Épaule	38%	10,1%	0,1%	Coude	7,35%	-1,8%	2,5%	Poignet	-1,1%	-1,35%	-3,7%
UD	-30.3		13%	8%	5,1%		42%	15,4%	5,04%		17,3%	9,8%	3,75%		14,3%	9,54%	3,51%
MAT	-29.51		16%	5%	8,2%		46,1%	25,5%	-0,6%		40,6%	12,8%	4,85%		18,0%	10,8%	2,2%

Le tableau (5.2) présente les résultats bruts. Le tableau (5.3) reprend les données pour une masse uniformisée des trois types d'éco-matériaux, en utilisant la règle de trois, afin de calculer la valeur de la baisse d'énergie proportionnelle à celle mesurée ci-dessus.



**Tableau 5.3 : Expérimentation : Baisse de l'énergie en % des éco-segments par rapport au Métal pour une masse uniformisée**

Moyenne EC en %		Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)			Joint	Charge portée par la pince du bras (en g)		
			0	107.66	209.08		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08		0	107.66	209.08
Matériau	$\Delta m$		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3		m1	m2	m3
UDMAT	18,2	Hanche	0,86%	0,50%	0,6%	Épaule	10,8%	7,11%	0,10%	Coude	2,51%	-1,36%	3,37%	Poignet	-0,31%	-0,76%	-3,04%
UD	18,2		1,57%	1,17%	1,0%		8,75%	7,84%	4,04%		4,31%	5,45%	3,72%		3,04%	3,89%	2,11%
MAT	18,2		1,52%	0,56%	1,2%		7,74%	10,4%	-0,38%		8,06%	5,71%	3,83%		3,05%	3,50%	1,04%

Les résultats du tableau (5.3), confirment la meilleure performance énergétique de la structure UD par rapport aux deux autres. De même que pour la simulation, les essais réels démontrent aussi une efficacité énergétique de la structure UD par rapport au métal.

## 5.2. Répétabilité de l'éco-manipulateur robotique

Cette expérience permet de découvrir la performance fonctionnelle du manipulateur. Puisque le manipulateur est confié à remplir la fonction d'un porteur de connecteur électrique pour la recharge d'un véhicule, il est important d'évaluer sa capacité de positionnement en précision. Les mesures de la répétabilité sont faites en fonction d'une charge attachée à l'extrémité du manipulateur (fig. 5.1 et tab. 5.4), cela dans le but de connaître sa performance positionnelle sous charge. Comme point de départ, on calcule la moyenne des coordonnées atteintes par le manipulateur, pour chaque exécution d'une même trajectoire, répétée au moins 25 fois (voir l'annexe 7) :

$$X_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_i \right) \quad (5.2)$$

$$Y_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right) \quad (5.3)$$

$$Z_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Z_i \right) \quad (5.4)$$

Où :

$X_i$  ,  $Y_i$  et  $Z_i$  : coordonnées mesurées du point destinataire de l'outil de bras robotique à la fin de la  $i^{\text{ème}}$  exécution de sa trajectoire.

$n$  : nombre total d'observations (au moins 25).

Ensuite, on calcule la distance moyenne pour chaque exécution :

$$l_i = \sqrt{(X_i - X_{moy})^2 + (Y_i - Y_{moy})^2 + (Z_i - Z_{moy})^2} \quad (5.5)$$

$$l_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (5.6)$$

Enfin, on calcule l'écart type :

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{moy})^2}{n - 1}} \quad (5.7)$$

Au fur à mesure que les données sont normalement distribuées, la mesure de répétabilité se situe à l'intérieur de l'intervalle (certitude de  $x$  chances sur 100 des observations incluses). Selon la loi normale, on distingue trois intervalles de fidélité, telles que :

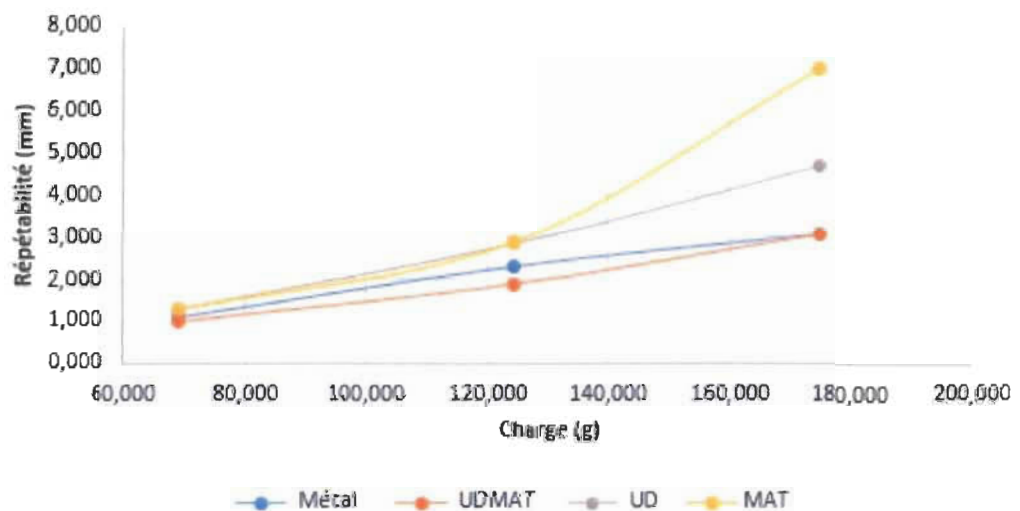
- 68% des observations se situent entre  $l_{moy} \pm S_l$
- 95% des observations se situent entre  $l_{moy} \pm 2S_l$
- 99% des observations se situent entre  $l_{moy} \pm 3S_l$

Ceci en choisissant la borne supérieure de l'intervalle comme mesure maximale possible de la répétabilité. Le détail de calcul se trouve dans annexe 7.

*Tableau 5.4 : Mesure de la répétabilité en fonction de la charge*

Charge (en kg)		0,069	0,124	0,175
Répétabilité (mm) $l_{moy} + 3S_l$	Métal	1,076	2,271	3,035
	UDMAT	0,974	1,856	3,041
	UD	1,295	2,843	4,689
	MAT	1,262	2,863	6,995

*Mesure de la répétabilité en fonction de la charge*



*Figure 5-1 : Comparaison de la répétabilité des quatre structures en fonction de la charge*

Le résultat de l'expérience favorise la structure UDMAT par rapport aux autres structures. Elle représente donc la structure la plus répétable. D'ailleurs, la répétabilité diminue pour toutes les structures avec l'augmentation de la charge portée par la pince. La structure la plus légère MAT et la plus mince a perdu quasiment sa performance positionnelle avec une charge forte à cause de sa faible rigidité.

Les erreurs de positionnement de l'effecteur, qui affectent la répétabilité mesurée, proviennent probablement des combinaisons des perturbations suivantes :

- Vibration du squelette robotique dû probablement à :
  - Faiblesse de la liaison mécanique au niveau des articulations.
  - Transmission variable des vibrations d'une structure à l'autre.
  - Type d'actionneur utilisé.
- Dégradation des connecteurs mécaniques pour un nombre important d'essais (plus de 100).
- Erreur provoquée par l'expérimentateur
  - machine à mesurer les coordonnées de type manuelle.
  - force de contact entre le palpeur et la bille parfois difficilement contrôlable.
- Déformation élastique due à la charge portée.

Dans cette étude nous n'avons pas tenté de les mesurer.

### **5.3. Conclusions**

Les résultats de ce chapitre ont permis de confirmer les résultats obtenus par la simulation. Le comportement dynamique simulé des robots avec un joint en fibres naturelles correspond bien avec ce qui a été mesuré en réalité. Les essais expérimentaux démontrent que l'éco-structure présente un avantage énergétique.

De plus, dans ce chapitre la mesure de la répétabilité des différentes structures confirme une performance positionnelle adéquate de l'éco-segment. Les éco-segments absorbent les vibrations tout en gardant une rigidité suffisante. La méthode de mesure par contact avec une machine à mesurer des coordonnées de type manuelle apporte une part d'incertitudes et les résultats pourraient être plus rigoureux en utilisant une machine

automatique. De même, la structure du manipulateur robotique utilisée pourrait être plus performante, pour éliminer les sources de perturbations rencontrées.

# Chapitre 6 : Conclusions et Perspectives

## 6.1. Retour sur les objectifs

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les performances dynamiques et énergétiques d'un manipulateur robotique dont un de ses segments de métal est remplacé par un segment en composite de fibres naturelles de lin.

Pour ce faire, un premier défi concerne la fabrication d'un des quatre membres du robot en un matériau éco-composite. Le membre « épaule » a été choisi pour sa criticité (il porte toute la charge) et sa simplicité de fabrication. Cette étape a été réalisée avec succès (moulage, imprégnation, usinage). Ensuite, le robot original, en alliage d'aluminium, s'est vu remplacer son segment « épaule » de métal par le nouveau matériau éco-composite (lin/époxyde) fabriqué avec trois types de renforts (UD, MAT et UDMAT). L'assemblage du nouveau joint avec les trois types de matériaux a été réalisé avec succès et la structure résultante est fonctionnelle dans les trois cas

Une simulation comparative entre les deux bras robotiques de matériaux différents a été réalisée. Les propriétés inertielles ont été identifiées à l'aide d'une modélisation 3D sur *SolidWorks*. Ceci a permis par la suite de calculer les couples fournis aux actionneurs par la méthode de *Newton-Euler*. Une simulation 3D de l'exécution des trajectoires de type trapèze a finalement été exécutée à l'aide du simulateur sur la plateforme *Matlab/Simulink*, en utilisant trois masses différentes dans la pince. Le calcul théorique de consommation énergétique de chaque joint, pour chaque type de robot, et pour chaque combinaison de masses dans la pince, a été réalisé avec succès.

Une série d'essais expérimentaux a ensuite été réalisée. Une partie des essais concerne la mesure d'intensité du courant à l'aide de capteurs spécifiques (ACS712) tout au long d'une trajectoire, dans le but de calculer l'énergie réelle cumulée par chaque actionneur, et la comparer avec les calculs de simulation. Une plateforme de mesure a été conçue et connectée aux actionneurs du robot. L'autre partie des essais expérimentaux concerne la performance positionnelle du bras en éco-segment, à l'aide d'un mouvement répétitif dont la position finale a été enregistrée sur une machine à mesurer les coordonnées. Encore ici un montage expérimental spécifique à cette tâche a été réalisé et adapté à la structure du robot. Après plusieurs ajustements les essais expérimentaux ont tous été réalisés avec succès.

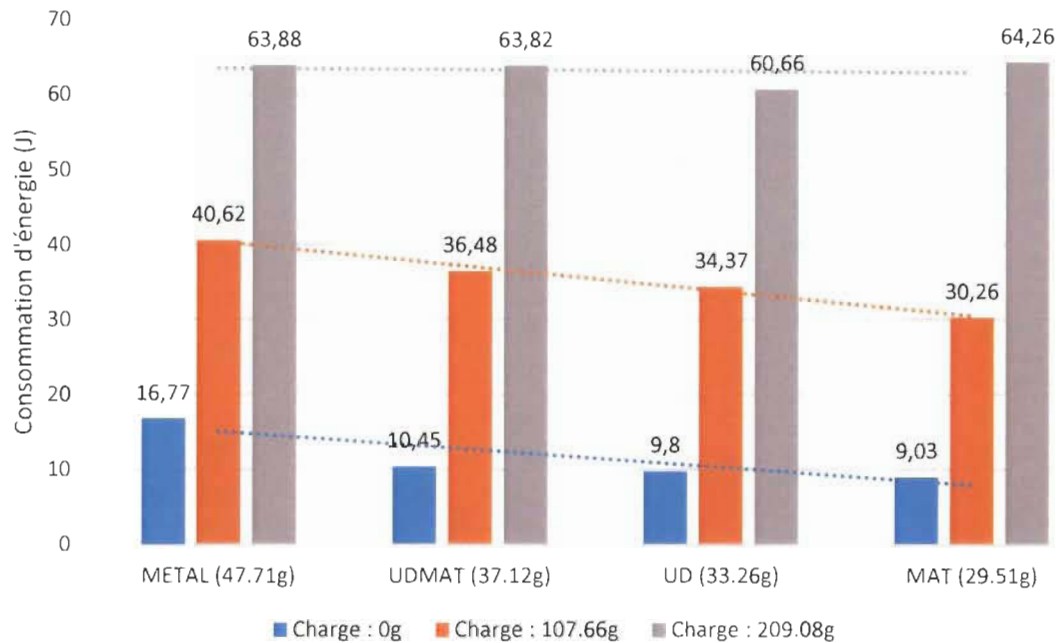
Ce travail est la première démarche vers l'écoconception d'une BR mobile comprenant un éco-manipulateur robotique. Il contribue à l'intégration complète de ces technologies de transport à faible impact écologique au réseau de transport actuel.

## **6.2. Compromis poids-répétabilité**

Le travail réalisé privilégie les éco-segments par rapport au segment en métal du manipulateur robotique. On a pris en considération le poids des segments comme un critère principal de l'étude, afin de mettre en évidence l'influence du poids et aussi de la rigidité de l'éco-segment sur la consommation d'énergie des actionneurs et sur la précision positionnelle de l'éco-manipulateur.

La simulation et l'expérimentation ont la même tendance sur l'objet de la consommation d'énergie des éco-segments par rapport au segment-métal. L'éco-segment UD représente un important écart de baisse d'énergie par rapport aux autres, ainsi qu'une bonne rigidité. Le segment UDMAT a démontré un écart d'énergie moins important que celui de UD, ainsi son cumul d'énergie s'approche celui de métal. Le segment MAT, a démontré une instabilité énergétique surtout pour une lourde charge. Ceci provient de sa faible rigidité

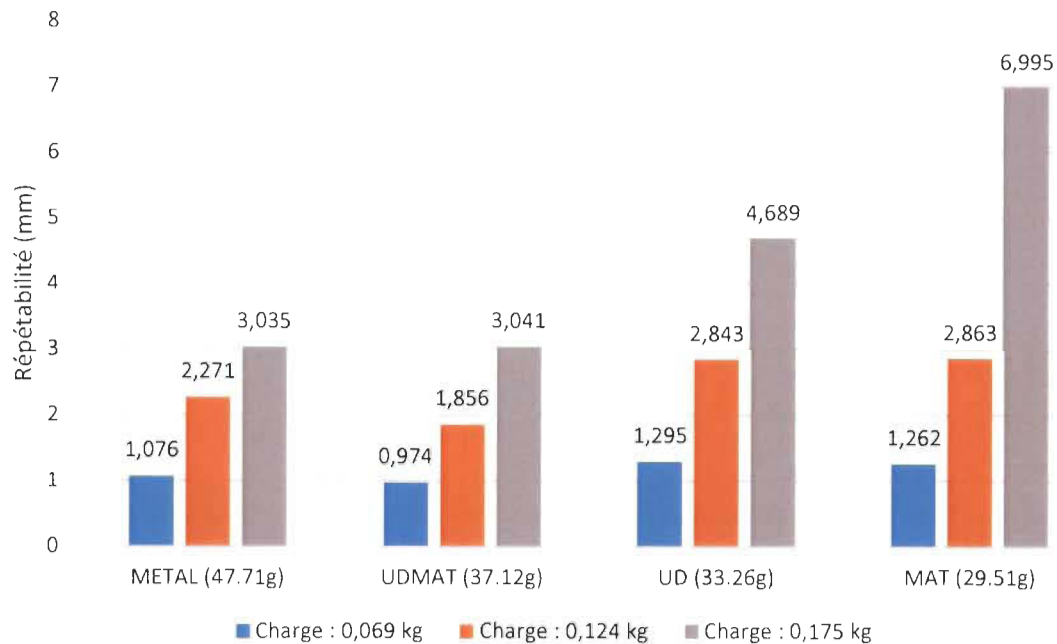
qui conduit le segment à une déformation élastique, provoquant ainsi une perte d'énergie. Ce résultat est illustré sur le diagramme en barres (fig. 6.1) qui représente la consommation d'énergie de l'épaule du manipulateur en fonction d'une charge embarquée par son organe terminal.



*Figure 6-1 : Consommation d'énergie de l'épaule pour différents segments*

D'autre part, la deuxième vague de résultats concerne la performance positionnelle comme une caractéristique importante d'un bras robotisé. La figure (6.2) illustre le résultat obtenu de la mesure de la répétabilité de manipulateur robotique avec les différents segments, en fonction d'une charge attachée à sa pince. L'essai-expérimental présenté ici démontre une bonne capacité de l'éco-segment à garder la précision de bras pour une tâche spécifique (variation de la charge), par rapport à celui en métal. Il se pourrait que la répétabilité du manipulateur n'a pas été toujours bonne (comme exemple ici de MAT) ; ce qui signifie que la fabrication d'un éco-segment a besoin sûrement d'une certaine exigence autour de ses caractéristiques mécaniques (exemple : rigidité).





*Figure 6-2 : Répétabilité du manipulateur robotisé pour différents segments*

L'étude a été faite implicitement entre les trois segments en éco-composite ayant des caractéristiques mécaniques différentes. On a tenté d'en déduire la structure qui donne le meilleur résultat énergétique et fonctionnel. Les résultats ci-dessus montrent un bon compromis énergie - répétabilité de l'éco-robot.

### 6.3. Perspectives d'avenir

Le potentiel des éco-segments robotiques ouvre la possibilité de changer d'autres composantes de la structure du robot. L'utilisation de renforts de lin développés au LMEM permet la fabrication de robots manipulateurs qui exploite la richesse du territoire Canadien de cette plante, tandis que la mise en évidence des performances du bras robotique en éco-composite sera présentée comme innovation exclusive d'une nouvelle application robotique écologique. En effet, l'écoconception est une solution innovatrice contemporaine pour avoir des produits d'un aspect écologique. On s'attend à ce que les

robots de service occupent une grande place dans un avenir rapproché pour toutes sortes de tâches de la vie quotidienne.

De même une optimisation topologique permettra de trouver une meilleure forme et géométrie de chaque segment afin de remplir une tâche de façon optimale. Ceci représente une nouvelle piste de recherche.

# Références

1. Charue-Duboc, F. and C. Midler, *Quand les enjeux environnementaux créent des innovations stratégiques: Le cas du véhicule électrique de Renault*. Revue Française de Gestion, 2011. **37**(215): p. 107-122,10-11,186-187.
2. Leroy, D., *Que sera l'industrie automobile, dans vingt ans ?* Réalités Industrielles, 2014: p. 23-34,100,102,104,107.
3. Ghamami, M., Y. Nie, and A. Zockaie, *Planing Charging Infrastructure for Plug-in Electric Vehicles in City Centers*. International Journal of Sustainable Transportation, 2014.
4. Lam, A.Y.S., A.Y.S. Yiu-Wing Leung, and A.Y.S. Xiaowen Chu, *Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions*. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2014. **5**(6): p. 2846-2856.
5. Ul-Haq, A., et al. *Smart charging infrastructure for electric vehicles*. in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2013 International Conference on*. 2013. IEEE.
6. Laboratory, S.E.R., *Artificial muscles and soft robotics*
7. Lebrun, G., A. Couture, and L. Laperrière, *Tensile and impregnation behavior of unidirectional hemp/paper/epoxy and flax/paper/epoxy composites*. Composite Structures, 2013. **103**: p. 151-160.
8. Toubal, L. and G. Lebrun. *Nouvelle méthode de fabrication des composites à fibres naturelles: Contribution d'une couche de papier à minimiser la disparité des propriétés mécaniques*. in *17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*. 2011. [9].
9. Ammoun, S., C. Boussard, and L. Bouraoui. *Modulowatt: description d'un système innovant de recharge de véhicule électrique*. in *6th National Conference on Control Architectures of Robots*. 2011.
10. Young Jae, J., K. Young Dae, and J. Seungmin, *Optimal design of the wireless charging electric vehicle*. 2012. p. 1-5.
11. *The 50 Best Innovations of 2010*. Times Magazine, (November 22 ).
12. Xu, P., et al., *An EV charging/swap station automatic battery replacement technology*. Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control, 2015. **43**(3): p. 150-154.

13. Nie, Y. and M. Ghamami, *A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure*. Transportation Research Part B, 2013. **57**: p. 172-190.
14. Arancibia, A. and K. Strunz, *Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging*. 2012. p. 1-6.
15. *The AKKA "Link & Go" concept vehicle*. Available from: <http://research.akka.eu>.
16. *Tesla reveals robotic snake car charger*. Available from: <http://www.bbc.com/news/technology-33794085>
17. *e-smartConnect: Volkswagen is conducting research on an automated quick-charging system for the next generation of electric vehicles*. Available from: [www.volkswagen-media-services.com](http://www.volkswagen-media-services.com).
18. Bréchet, Y., *La science des matériaux: du matériau de rencontre au matériau sur mesure. Extraits de la leçon inaugurale prononcée le 13 janvier 2013*. La lettre du Collège de France, 2013(36): p. 7.
19. Ouali, A.-A., et al. *Composites en matières premières renouvelables et leurs procédés*. in *Conférence Matériaux 2014-Colloque Ecomatériau*. 2014.
20. Rabetafika, H.N., M. Paquot, and P. Dubois, *Les polymères issus du végétal: matériaux à propriétés spécifiques pour des applications ciblées en industrie plastique Features of plant-based polymers with special applications in plastic field*. 2006.
21. John, M.J. and S. Thomas, *Biofibres and biocomposites*. Carbohydrate Polymers, 2008. **71**(3): p. 343-364.
22. Rutot, D. and P. Dubois, *Les (bio) polymères biodégradables: l'enjeu de demain?* CHIMIE NOUVELLE., 2004(86): p. 66-74.
23. Krasnyi, B., V. Tarasovskii, and A. Krasnyi, *Use of new ceramic and refractory materials — an important factor in improving the economic and energy efficiency of enterprises, and their ecological security*. Refractories and Industrial Ceramics, 2010. **51**(4): p. 236-246.
24. Escadeillas, G., *Les éco-matériaux dans la construction: Enjeux et perspectives*. Actes des 7èmes (RF) 2B, 2006.
25. El Mahi, A., et al. *Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites*. in *10ème Congrès Français d'Acoustique*. 2010.
26. *Laboratoire de Mécanique et Éco-matériaux - UQTR*. Available from: <http://www.uqtr.ca/>.
27. Wambua, P., J. Ivens, and I. Verpoest, *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?* Composites Science and Technology, 2003. **63**(9): p. 1259-1264.

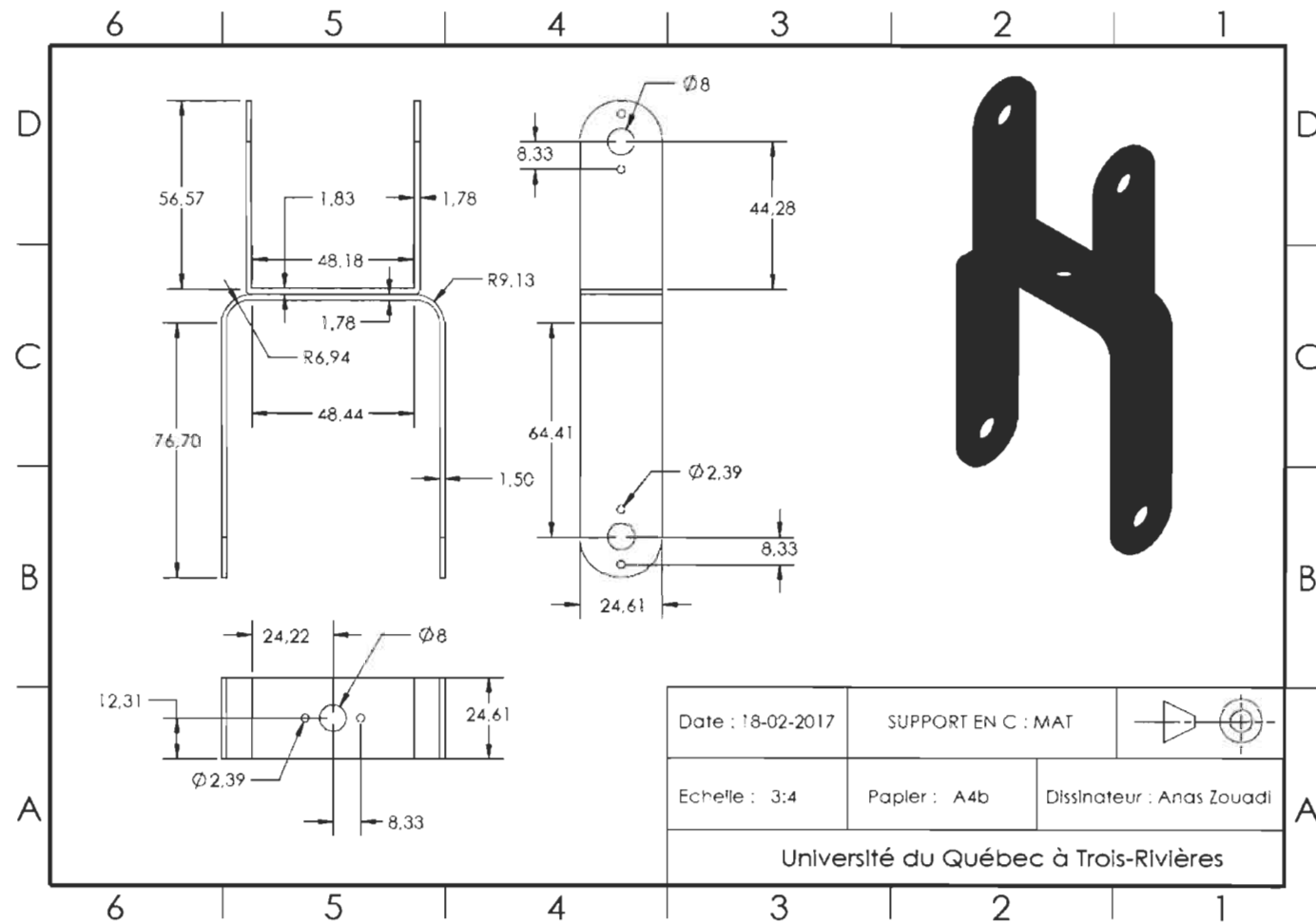
28. Bravo, A., et al., *Life and damage mode modeling applied to plastic gears*. Engineering Failure Analysis, 2015. **58**: p. 113-133.
29. Mijiyawa, F., et al., *Formulation and tensile characterization of wood–plastic composites*. 2015. **28**(12): p. 1675-1692.
30. *Aerospace approvals soon for natural fibre composites*. Materials Today, 2000. **3**(3): p. 9.
31. Anandjiwala, R. and S. Blouw, *Composites from Bast Fibres-Prospects and Potential in the Changing Market Environment*. Journal of Natural Fibers, 2007. **4**(2): p. 91-109.
32. Dahlke, B., et al., *Natural fiber reinforced foams based on renewable resources for automotive interior applications*. Journal of cellular plastics, 1998. **34**(4): p. 361-379.
33. Albán, O.A.V., *Contribution à l'identification et à la commande des robots parallèles*. 2005, Université Paris.
34. Venture, G., *Identification des paramètres dynamiques d'une voiture*. 2003, Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN); Université de Nantes.
35. Meissonier, J., *Identification des paramètres géométriques et élastocinématiques de mécanismes de liaison au sol automobile*. 2006, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
36. Bahloul, W., et al. *Identification des paramètres dynamiques de la machine synchrone par algorithme génétique*. in *International Renewable Energy Congress, Sousse, Tunisia*. 2009. [23].
37. Wu, J., J. Wang, and Z. You, *An overview of dynamic parameter identification of robots*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2010. **26**(5): p. 414-419.
38. Khalil, W., et al. *Identification expérimentale des paramètres inertiels de la charge d'un robot Stäubli RX90*. in *Conférence Internationale Francophone d'Automatique-CIFA 2006*. 2006.
39. Pruefer, M., C. Schmidt, and F. Wahl. *Identification of robot dynamics with differential and integral models: A comparison*. in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1994.
40. Khalil, W. and E. Dombre, *Modélisation, identification et commande des robots*. 2e éd. revue et augm. ed. [27]. 1999, Paris: Hermès Science Publications. 503 p.
41. Gautier, M., *A comparison of filtered models for dynamic identification of robots*. 1996. p. 875-880.
42. Gautier, M. and W. Khalil, *On the identification of the inertial parameters of robots*. 1988, [26]. p. 2264-2269.
43. Olsen, M.M. and H.G. Petersen, *A new method for estimating parameters of a dynamic robot model*. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 2001. **17**(1): p. 95-100.

44. Arm robot AL5B. Available from: [www.lynxmotion.com](http://www.lynxmotion.com)
45. Mohamed HABIBI, E.R., Gilbert Lebrun, and Luc Laperrière, *Experimental analysis and modeling of the impregnation of thin flax fiber mats manufactured with paper making machinery*. Textile Research Journal, 2017.
46. Mohamed Habibi, G.L., and Luc Laperrière, *Experimental characterisation of short flax fiber mat composites: tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission*. Journal of Materials Science, 2017. **52**: p. 6567-6580.
47. M. Habibi, L.L., G. Lebrun, and L. Toubal, *Combining short flax fiber mats and unidirectional flax yarns for composite applications: Effect of short flax fibers on biaxial mechanical properties and damage behaviour*. Composites Part B: Engineering, 2017.
48. Sciavicco, L. and B. Siciliano, *Modelling and control of robot manipulators*. 2000.
49. Mohamed, S., N. Albert, and B. Ilian, *Assessment of the positioning performance of an industrial robot*. Industrial Robot: An International Journal, 2012. **39**(1): p. 57-68.
50. Laperrière, L., *ING1045 – TOLÉRANCEMENT ET CAO*.
51. Bouchard, S. *Robotic Gripper Repeatability Definition and Measurement*. Available from: <http://blog.robotiq.com>.
52. Breth, J.-F., et al., *Modelling of repeatability phenomena using the stochastic ellipsoid approach*. Robotica, 2006. **24**(4): p. 477-490.
53. Krasnansky, R., et al., *Reference trajectory tracking for a multi-DOF robot arm*. Archives Of Control Sciences, 2015. **25**(4): p. 513-527.
54. Rishikesh, R. and P. Pushparaj Mani, *Dual Arm Free Flying Space Robot Trajectory Planning Using Polynomial*. Journal of Robotics, 2015.

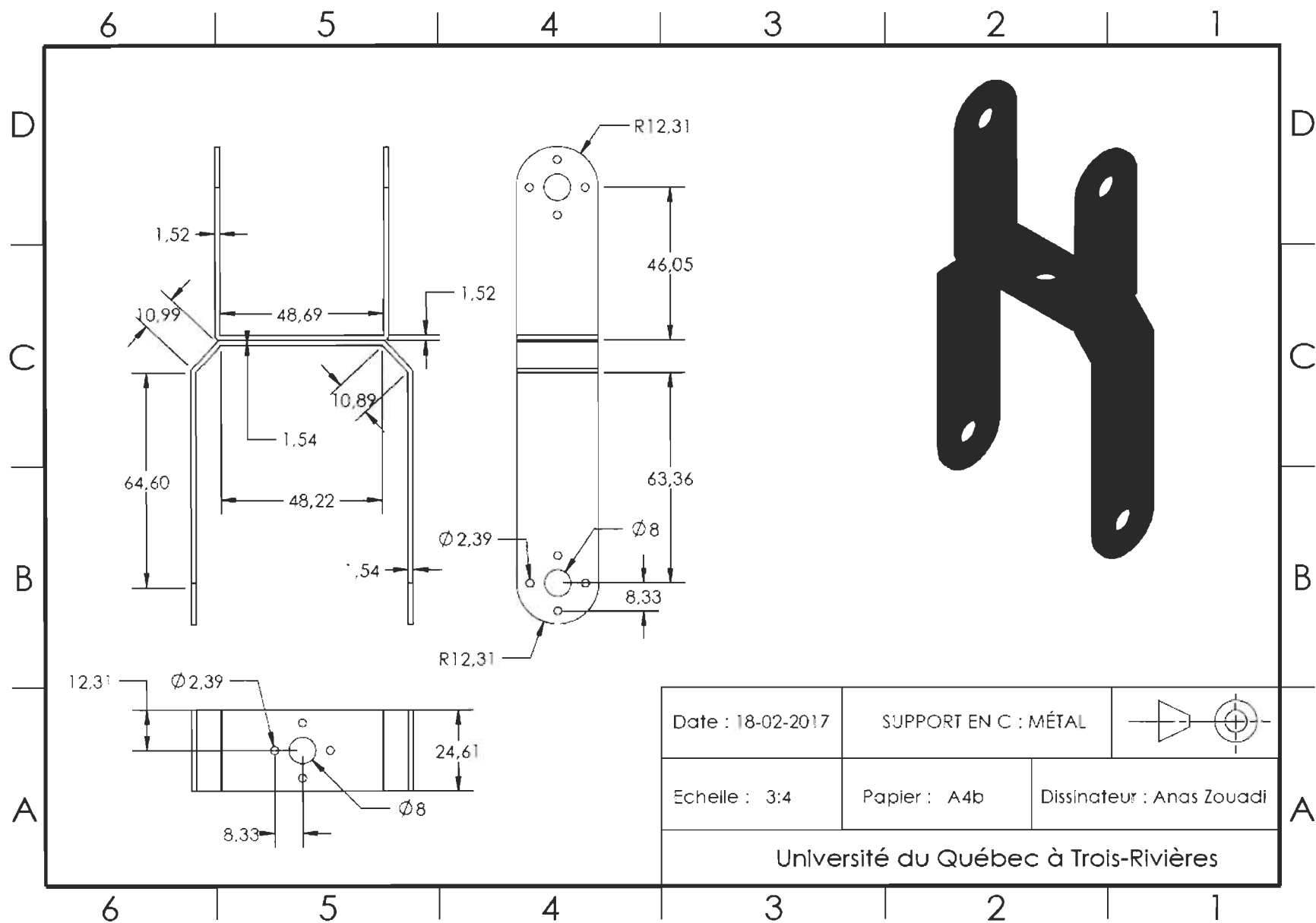
# Annexe

<i>Annexe 1 : Segments en éco-composite (lin/époxyde) : mise en plan sur SolidWorks .....</i>	<i>68</i>
<i>Annexe 2 : Vue éclatée des segments de bras robotique AL5B .....</i>	<i>72</i>
<i>Annexe 3 : Bras robotique AL5B[9] .....</i>	<i>76</i>
<i>Annexe 4 : Paramètres du matériau et du procédé pour la fabrication d'éco-segment.....</i>	<i>77</i>
<i>Annexe 5 : Scripts de simulateur sur MATLAB/Simulink.....</i>	<i>79</i>
<i>Annexe 6 : Énergie consommée par les actionneurs pour les différentes structures .....</i>	<i>101</i>
<i>Annexe 7 : Mesure de la répétabilité du manipulateur .....</i>	<i>102</i>

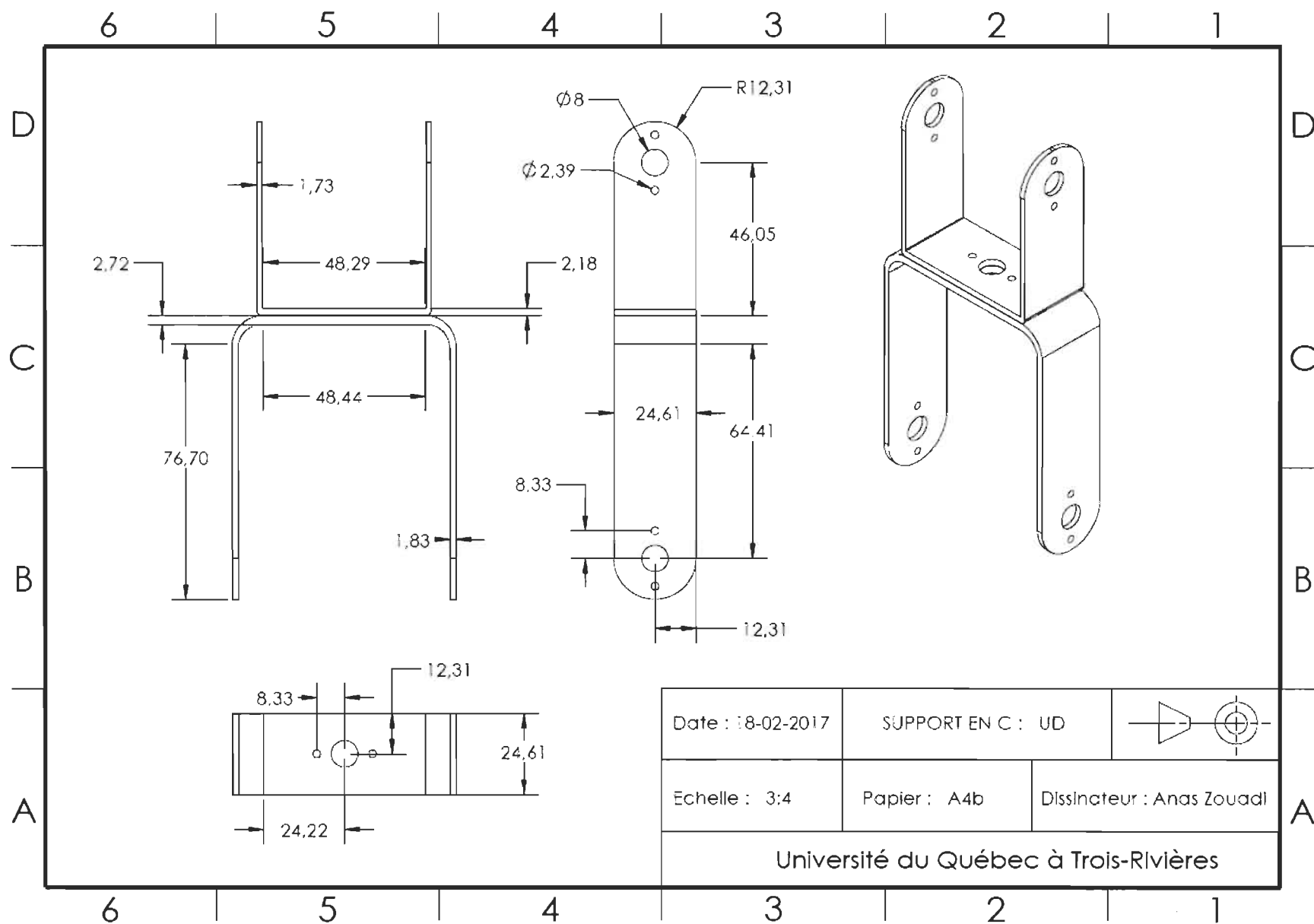
# Annexe 1 : Segments en éco-composite (lin/époxyde) : mise en plan sur SolidWorks



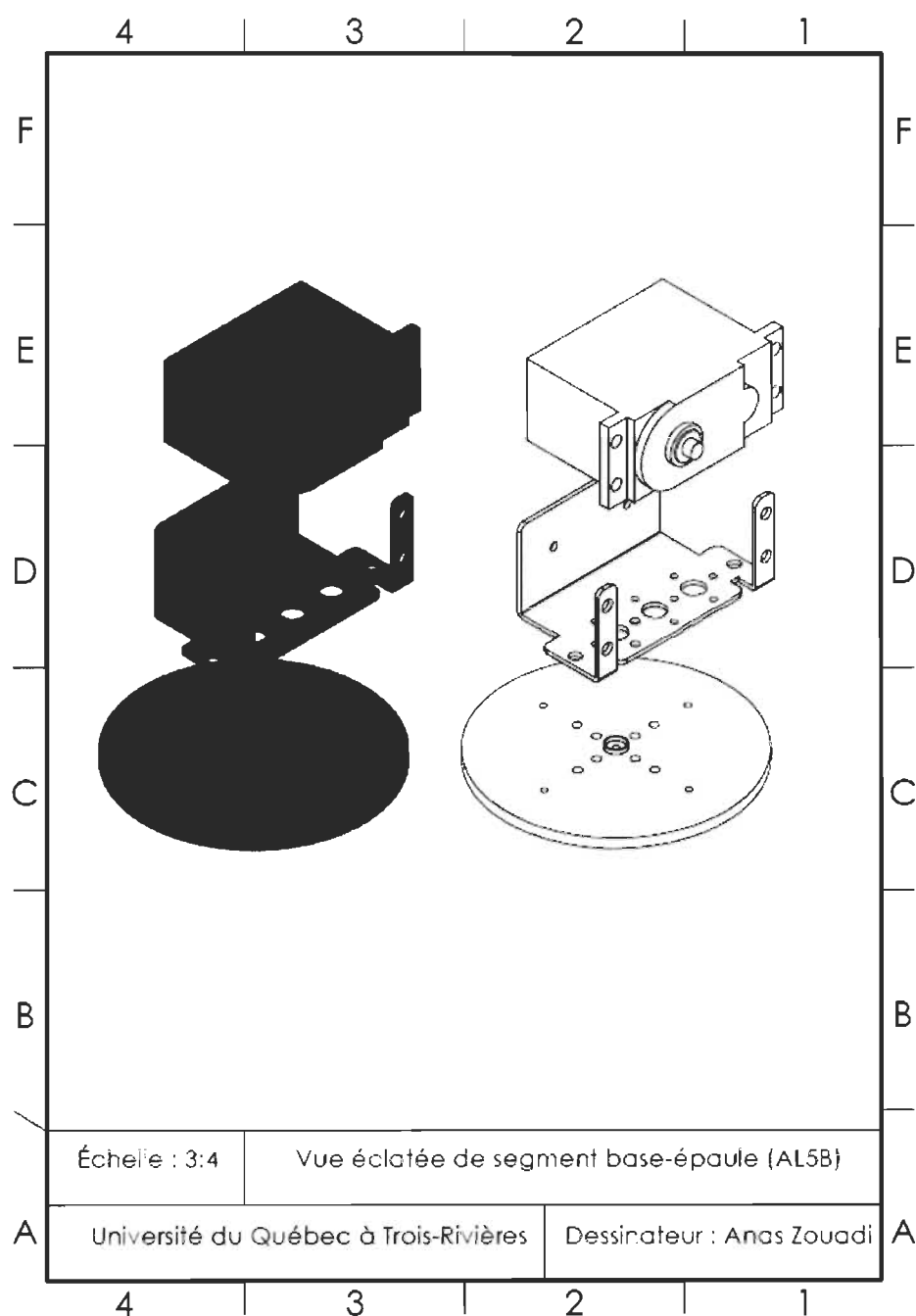


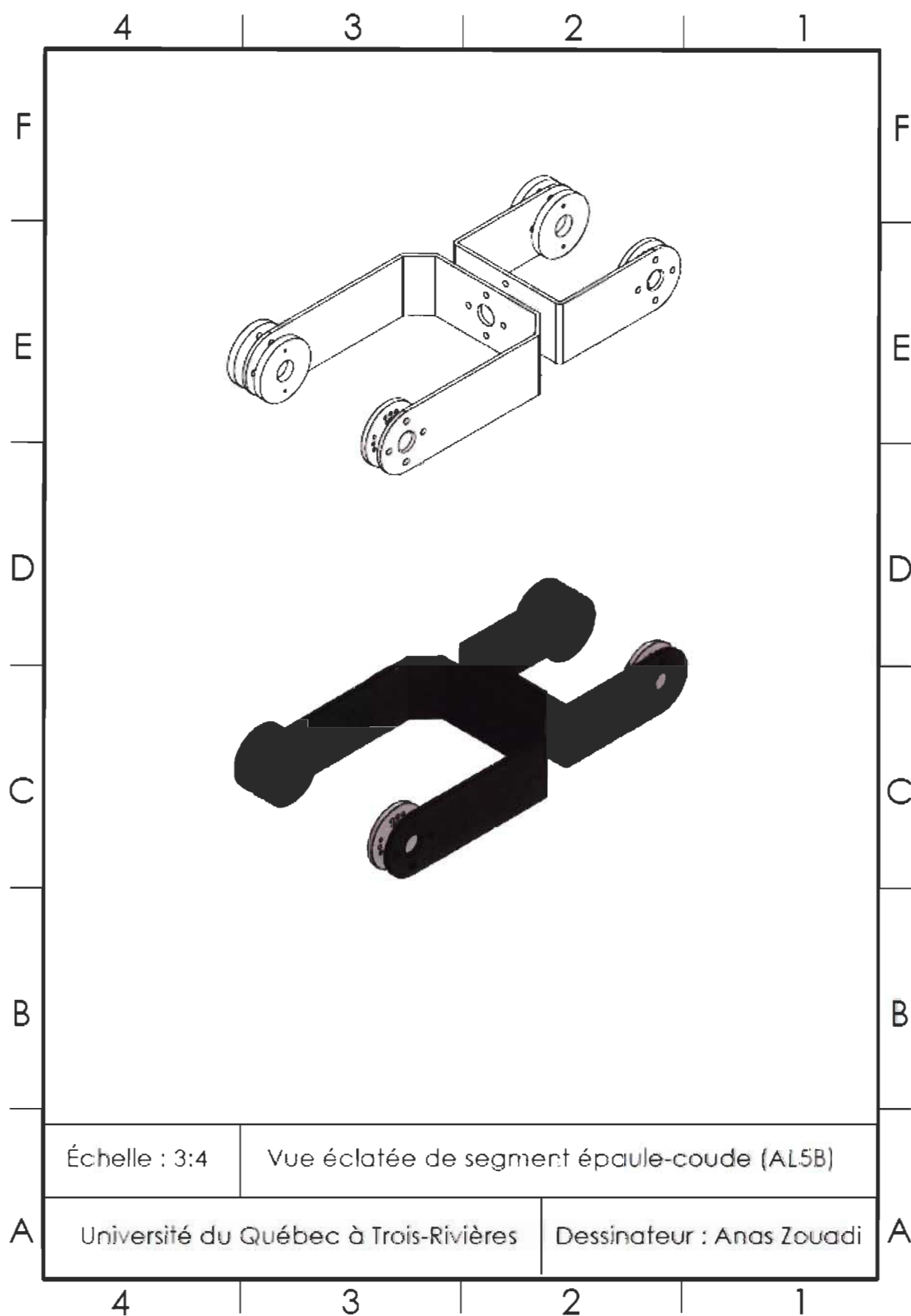


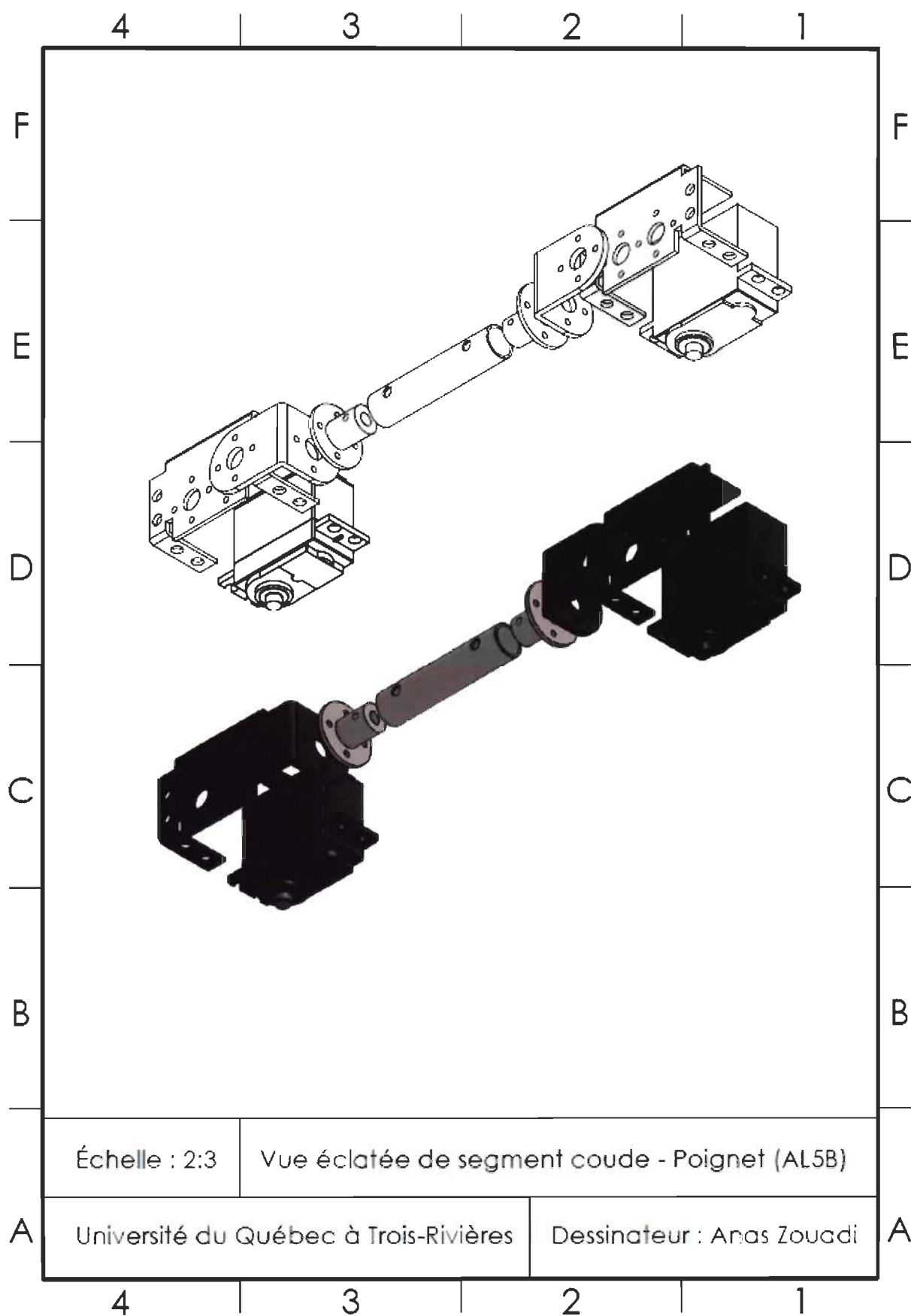


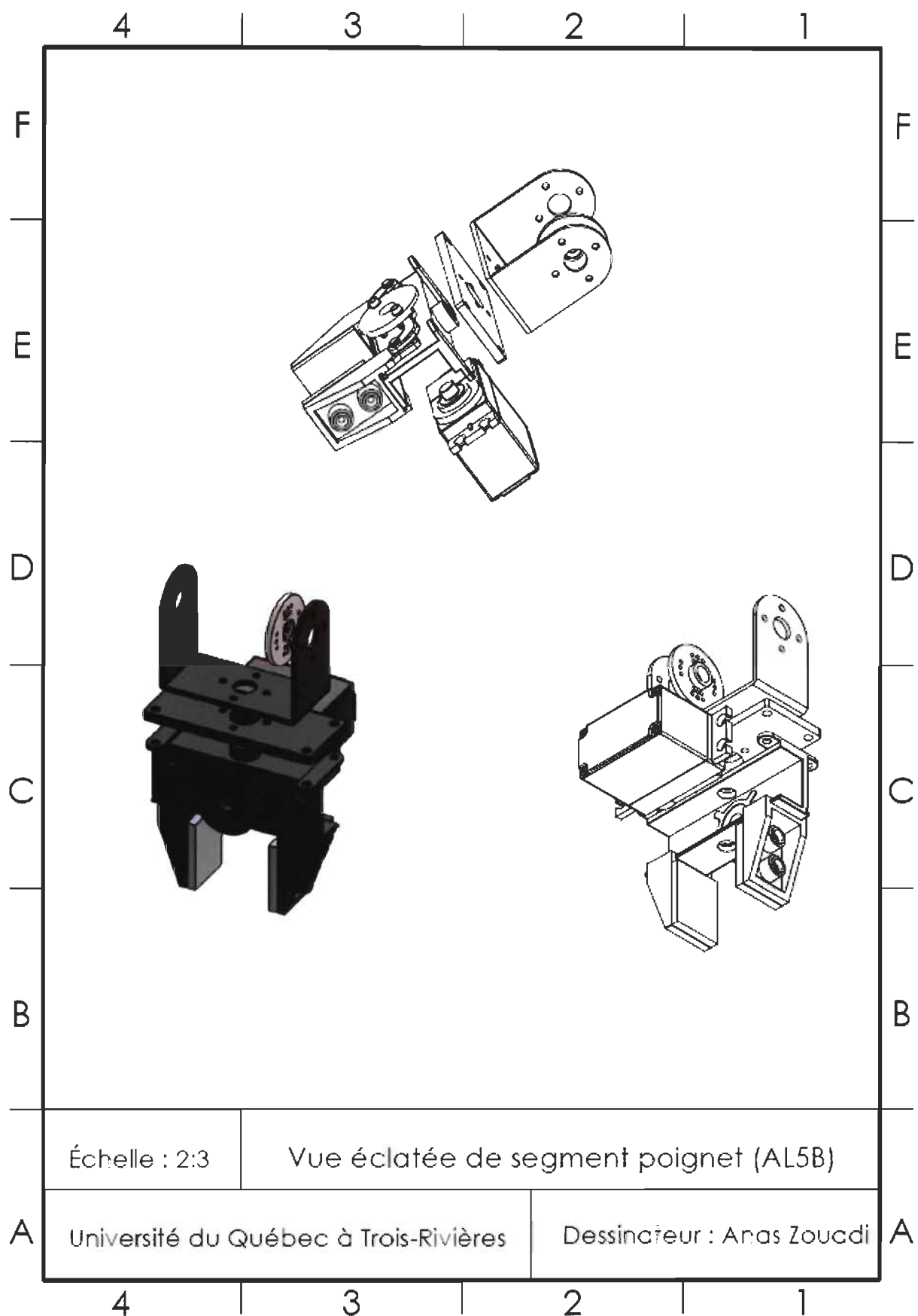


## Annexe 2 : Vue éclatée des segments de bras robotique AL5B



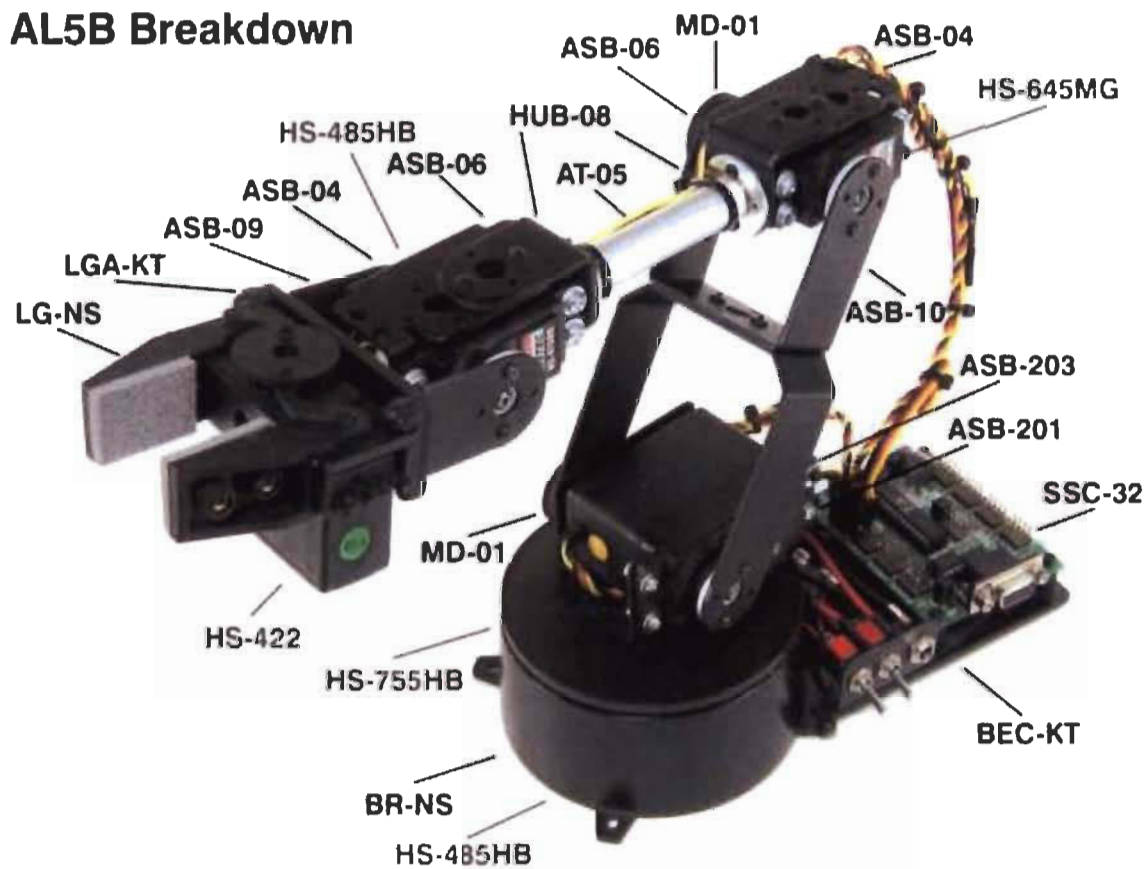






## Annexe 3 : Bras robotique AL5B<sup>[9]</sup>

### AL5B Breakdown





## Annexe 4 : Paramètres du matériau et du procédé pour la fabrication d'éco-segment

- Calcul des paramètres du matériau et du procédé pour la fabrication d'éco-segment :

- **Densité surfacique du renfort :**

UD : 320 g/m<sup>2</sup> → Nombre de couche : 3

Mat : 100 g/m<sup>2</sup> → Nombre de couche : 9

UDMAT : 420 g/m<sup>2</sup> → Nombre de couche : 3

- **Densité volumique du composite :**

UD, MAT et UDMAT : 1450 g/cm<sup>3</sup>

- **Épaisseur de la pièce moulée :**

UD : 1.83 mm

MAT : 1.50 mm

UDMAT : 2.20 mm

- **Fraction volumique de renfort :**

$$F_v = \frac{N \cdot W}{\rho \cdot e} \quad (A4.1)$$

Où :

$Fv$  : Fraction volumique de renfort (%)

$N$  : Nombre de couches

$W$  : Densité surfacique du renforts ( $g/m^2$ )

$\rho$  : Masse volumique du composite ( $g/cm^3$ )

$e$  : épaisseur de piece moulée ( $m$ )

**MAT :**

$$Fv_{MAT} = \frac{9 \times 100}{1450 \times 1.50} = 41.37 \% \quad (A4.2)$$

**UD :**

$$Fv_{UD} = \frac{3 \times 320}{1450 \times 1.83} = 36.17 \% \quad (A4.3)$$

**UDMAT :**

$$Fv_{UDMAT} = \frac{3 \times 420}{1450 \times 2.2} = 39.49 \% \quad (A4.4)$$

# Annexe 5 : Scripts de simulateur sur MATLAB/Simulink

## A4.1. Script principal

```
close all
clear
clc

matériau=['METAL';'UDMAT';'UD  '; 'MAT  '];
celldata = cellstr(matériau);

run('chemin_accès.m')

for j=1:4
    chemin_TF(1,j)=file_TF(1,j);
end
for u=1:4
    chemin_E(1,u)=file_E(1,u);
end
i=1;
while i<=4
    k=1;
    matériau.time = 1; % dimension 1x1
    matériau.signals.values =i; % dimension 1x1
    matériau.signals.dimensions = 1;

    fT=chemin_TF(1,i);
    fE=chemin_E(1,i);

    while k<=3
        charge.time = 1; % dimension 1x1
        charge.signals.values = k; % dimension 1x1

        charge.signals.dimensions = 1;
        main_AL5B_SIMULINK_EXECUTION(k,fT,fE)
        k=k+1;
    end
    i=i+1;
end
```

## A4.2. Script : chemin\_accès.m

```
X='C:\Users\ugtr_autologon\Desktop\RESULTATS finales 250117\RESULTATS finales
250117\Simulation\Torques - Forces\';
file_TF(1,1)=[X, '1- T-F MÉTAL.xlsx'];
file_TF(1,2)=[X, '2- T-F UDMAT.xlsx'];
file_TF(1,3)=[X, '3- T-F UD.xlsx'];
file_TF(1,4)=[X, '4- T-F MAT.xlsx'];

Y='C:\Users\ugtr_autologon\Desktop\RESULTATS finales 250117\RESULTATS finales
250117\Simulation\PW SIMULATION\';
file_E(1,1)=[Y, '1 - PW MÉTAL.xlsx'];
file_E(1,2)=[Y, '2 - PW UDMAT.xlsx'];
file_E(1,3)=[Y, '3 - PW UD.xlsx'];
file_E(1,4)=[Y, '4 - PW MAT.xlsx'];
```

```

function main_ALSB_SIMULINK_EXECUTION(k, fT, fE)
delete('data_T_F_q_qd_qdd.mat')
sim('AL5B_Sim_trapeze')
%
run('Load_Trq_Forces_from_AL5B_SIM.m')
NSheet=k;
Excel_file(trq1, trq2, trq3, trq4, f1, f2, f3, f4, qd, t, NSheet, fT, fE)
run('choix_mat.m')
run('Moyenne_Force_Tororque_XYZ.m')
%
Torquesplot(trq1, trq2, trq3, trq4, t)
Forcesplot(t, f1, f2, f3, f4)
Trajectoireplot(q, qd, qdd, t)
%
run('Aim_AL5B.m')
end

function Trajectoireplot(q, qd, qdd, t)
function Forcesplot(t, f1, f2, f3, f4)
function Torquesplot(trq1, trq2, trq3, trq4, t)
function Torquesplot(trq1, trq2, trq3, trq4, t)
function Exportation_dipN_toExcel(fT, fE, NSheet, trq1, trq2, trq3, trq4, f1, f2, f3, f4, qd, t)

```

## A4.4. Fonction : plot des trajectoires

```

function Trajectoireplot(q, qd, qdd, t)

q1=q(:,1);
q2=q(:,2);
q3=q(:,3);
q4=q(:,4);

dq1=qd(:,1);
dq2=qd(:,2);
dq3=qd(:,3);
dq4=qd(:,4);

ddq1=qdd(:,1);
ddq2=qdd(:,2);
ddq3=qdd(:,3);
ddq4=qdd(:,4);

% Plot trajectoires

figure(1)
plot(t, q1, 'b-', t, dq1, 'g--', t, ddq1, 'r-.', 'LineWidth', 2);
legend('q1', 'dq1/dt', 'dq1/dt^2');
xlabel('temps (s)'); ylabel('Joint 1');
%
figure(2)
plot(t, q2, 'b-', t, dq2, 'g--', t, ddq2, 'r-.', 'LineWidth', 2);
legend('q2', 'dq2/dt', 'dq2/dt^2');
xlabel('temps (s)'); ylabel('Joint 2');
%
figure(3)
plot(t, q3, 'b-', t, dq3, 'g--', t, ddq3, 'r-.', 'LineWidth', 2);
legend('q3', 'dq3/dt', 'dq3/dt^2');
xlabel('temps (s)'); ylabel('Joint 3');
%
figure(4)
plot(t, q4, 'b-', t, dq4, 'g--', t, ddq4, 'r-.', 'LineWidth', 2);
legend('q4', 'dq4/dt', 'dq4/dt^2');
xlabel('temps (s)'); ylabel('Joint 4');
end

```

```

function Torquesplot(trq1,trq2,trq3,trq4,t)
% Plot trajectories

tur1x=trq1(:,1);
tur1y=trq1(:,2);
tur1z=trq1(:,3);

figure(9)
plot(t,tur1x,'b-',t,tur1y,'g--',t,tur1z,'r-.','LineWidth',2);
legend('tau1x','tau1y','tau1z');
xlabel('time (sec)'); ylabel(' Torque 1');
%
tur2x=trq2(:,1);
tur2y=trq2(:,2);
tur2z=trq2(:,3);

figure(10)
plot(t,tur2x,'b-',t,tur2y,'g--',t,tur2z,'r-.','LineWidth',2);
legend('tau2x','tau2y','tau2z');
xlabel('time (sec)'); ylabel(' Torque 2');
%
tur3x=trq3(:,1);
tur3y=trq3(:,2);
tur3z=trq3(:,3);

figure(11)
plot(t,tur3x,'b-',t,tur3y,'g--',t,tur3z,'r-.','LineWidth',2);
legend('tau3x','tau3y','tau3z');
xlabel('time (sec)'); ylabel(' Torque 3');
%
tur4x=trq4(:,1);
tur4y=trq4(:,2);
tur4z=trq4(:,3);

figure(12)
plot(t,tur4x,'b-',t,tur4y,'g--',t,tur4z,'r-.','LineWidth',2);
legend('tau4x','tau4y','tau4z');
xlabel('time (sec)'); ylabel(' Torque 4');
end

```

## A4.6. Fonction : message de retour pour l'enregistrement des données sur l'Excel

```

function Excel_file(trq1,trq2,trq3,trq4,f1,f2,f3,f4,qd,t,NSheet,fT,fE)
%
fprintf('\n-----\n');
fprintf('Création et l'enregistrement sont encore... \n');
fprintf('-----\n');
Exportation_dipN_toExcel(fT,fE,NSheet,trq1,trq2,trq3,trq4,f1,f2,f3,f4,qd,t)
fprintf('Exportation des données est terminé avec succès. \n');
fprintf('-----\n');
end

```

## A4.7. Fonction : Exportation des données vers l'Excel

```
function Exportation_dipN_toExcel(fT,fE,NSheet,trq1,trq2,trq3,trq4,f1,f2,f3,f4,qd,t)
%
tur1x=abs(trq1(:,1));
tur1y=abs(trq1(:,2));
tur1z=abs(trq1(:,3));

tur2x=abs(trq2(:,1));
tur2y=abs(trq2(:,2));
tur2z=abs(trq2(:,3));

tur3x=abs(trq3(:,1));
tur3y=abs(trq3(:,2));
tur3z=abs(trq3(:,3));

tur4x=abs(trq4(:,1));
tur4y=abs(trq4(:,2));
tur4z=abs(trq4(:,3));

C1='C1';
C2='H1';
C3='M1';
C4='R1';

C10='K1';
C11='AN1';
C12='BQ1';
C13='CT1';

Write_torques_dq_t()

flx=abs(f1(:,1));
fly=abs(f1(:,2));
flz=abs(f1(:,3));

f2x=abs(f2(:,1));
f2y=abs(f2(:,2));
f2z=abs(f2(:,3));

f3x=abs(f3(:,1));
f3y=abs(f3(:,2));
f3z=abs(f3(:,3));

f4x=abs(f4(:,1));
f4y=abs(f4(:,2));
f4z=abs(f4(:,3));

C5='X1';
C6='AC1';
C7='AH1';
C8='AM1';
Write_forces()

temps_vct=t;
C9='C1';
temps()

dq1=(qd(:,1));
dq2=(qd(:,2));
dq3=(qd(:,3));
dq4=(qd(:,4));

C14='F1';
C15='A11';
C16='B11';
C17='CQ1';
vitesse_ang()

end
```



```

function Write_torques_dq_t()

T1 = table(turlx,turly,turlz);
writetable(T1,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C1);
writetable(T1,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C10);
T2 = table(tur2x,tur2y,tur2z);
writetable(T2,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C2);
writetable(T2,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C11);
T3 = table(tur3x,tur3y,tur3z);
writetable(T3,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C3);
writetable(T3,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C12);
T4 = table(tur4x,tur4y,tur4z);
writetable(T4,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C4);
writetable(T4,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C13);
end
function Write_forces()
T1 = table(flz,flx,flz);
writetable(T1,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C5);
T2 = table(f2x,f2y,f2z);
writetable(T2,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C6);
T3 = table(f3x,f3y,f3z);
writetable(T3,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C7);
T4 = table(f4x,f4y,f4z);
writetable(T4,fT,'Sheet',NSheet,'Range',C8);
end
function temps()
T1 = table(temps_vct);
writetable(T1,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C9);
end
function vitesse_ang()
T1 = table(dq1);
writetable(T1,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C14);
T2 = table(dq2);
writetable(T2,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C15);
T3 = table(dq3);
writetable(T3,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C16);
T4 = table(dq4);
writetable(T4,fE,'Sheet',NSheet,'Range',C17);
end
end

```

## A4.8. Script : exportation des données vers l'espace de travail

```

t=temps.signals.values(1,:,:)';

trq1=Torque_1.signals.values(:, :,1)';
trq2=Torque_2.signals.values(:, :,1)';
trq3=Torque_3.signals.values(:, :,1)';
trq4=Torque_4.signals.values(:, :,1)';

f1=Force_1.signals.values(:, :,1)';
f2=Force_2.signals.values(:, :,1)';
f3=Force_3.signals.values(:, :,1)';
f4=Force_4.signals.values(:, :,1)';

q=Pos_ang.signals.values(:, :,1);
qd=Vitesse.signals.values(:, :,1);
qdd=Acc.signals.values(:, :,1);

save('data_T_F_q_qd_qdd','t','trq1','trq2','trq3','trq4','f1','f2','f3','f4','q','qd','qdd');

```

## A4.9. Script : Animation du robot 'Aim\_AL5B.m'

```
% DÉFINITION DU ROBOT SELON DH STANDARD DU MATLAB
% L'AXE Y DU ROBOT EST COMPORTÉ COMME L'AXE Z DU ROBOT SELON LA CONVENTION
% DE DH POUR LES TROIS DERNIERS JOINTS

%Paramètre de D-H
%L =link([alpha A theta D sigma])

d1=Long1.signals.values(:,1);
a1=Long2.signals.values(:,1);
a2=Long3.signals.values(:,1);
d4=Long4.signals.values(:,1);

alpha=[pi/2 0 0 -pi/2];
theta=[0 0 0 0];
a=[0 a1 a2 d4];
d=[d1 0 0 0];
sigma=[0 0 0 0];

L{1} = link([0 0 0 0 0]); % LINK = 0 : ENTRE LA TABLE FIXE ET LE
JOINT 1 SUIVANT Z DU ROBOT
L{2} = link([alpha(1) a(1) theta(1) d(1) sigma(1)]); % LINK = 0 : ENTRE LE JOINT 1 ET 2
SUIVANT Z DU ROBOT
L{3} = link([alpha(2) a(2) theta(2) d(2) sigma(2)]); % LINK = 0.146 : ENTRE LE JOINT
2 ET 3 SUIVANT X DU ROBOT
L{4} = link([alpha(3) a(3) theta(3) d(3) sigma(3)]); % LINK = 0.188 : ENTRE LE JOINT
3 ET 4 SUIVANT X DU ROBOT
L{5} = link([alpha(4) a(4) theta(4) d(4) sigma(4)]); % LINK = 0.085 : ENTRE LE JOINT
4 ET LE PINCE SUIVANT X DU ROBOT

ROBOT = robot(L);
ROBOT.name = 'AL5B';

%vars=[L1,L2,L3,L4,L1C1,L2C2,L3C3,L4C4,L2C1,L3C2,L4C3,m1,m2,m3,m4,m5,g];
%vars=[0.048 0.146 0.188 0.085 0.024 0.073 0.094 0.0425 0.073 0.094 0.0425 0.5 0.3 0.2
0.1 0 9.80665];

% exportation de position angulaire à workspace
q=(Pos_ang.signals.values(:,1));

q1=q(:,1); % 1eme joint
q2=q(:,2); % 2eme joint
q3=q(:,3); % 3eme joint
q4=q(:,4); % 4eme joint

qM=zeros(length(q1),1); % joint imposé par Matlab

% Positions d'effecteur
P=(Pos_eff_DH.signals.values(:,1));

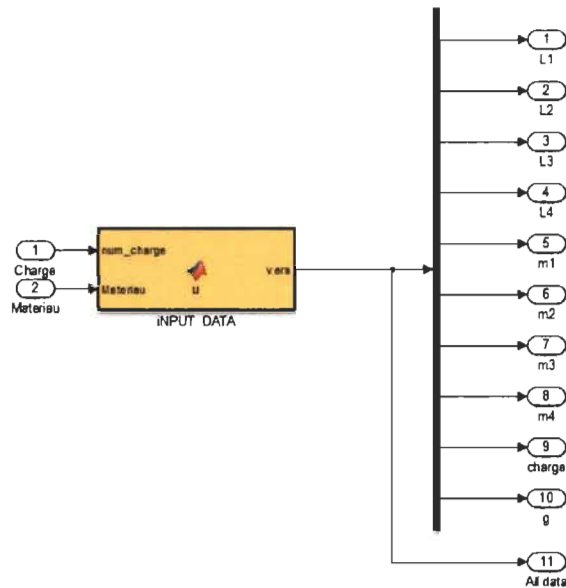
% Graphique du robot avec son animation
figure(13)
hold on

plot3(P(:,1),P(:,2),P(:,3),'r', 'LineWidth',3)
plot(ROBOT,[qM q1 q2 q3 q4]);
%movie2avi(ROBOT, 'myPeaks.avi', 'compression', 'None');
%%drivebot(ROBOT)
```



## A4.10. Simulink: sim('AL5B\_Sim\_trapeze')

### A4.10.1. Data d'entrées



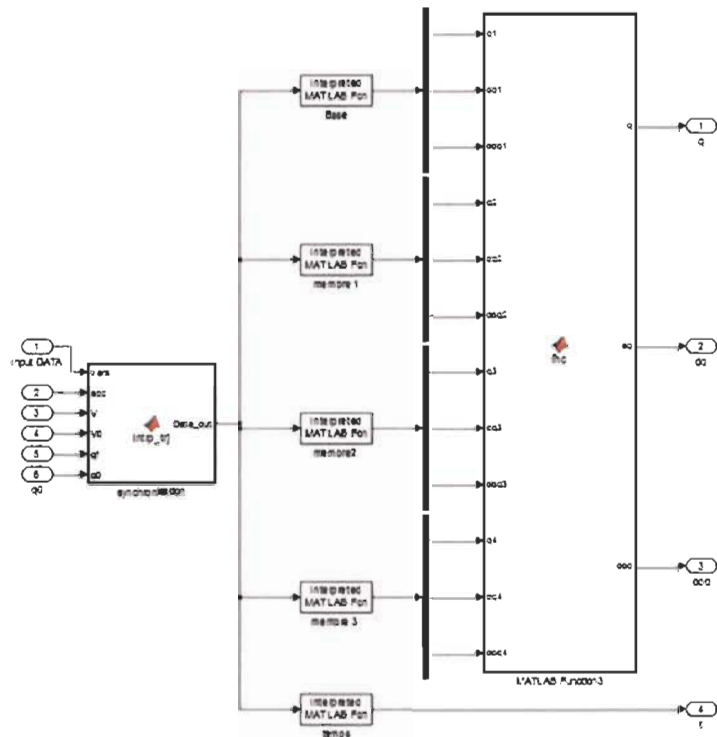
```
function vars=u(num_charge,Materiau)
% Fonction contient les paramètres de définition des variables du problème

% L1 = hauteur de base
% L2 = longueur de la membrure 1
% L3 = longueur de la membrure 2
% L4 = longueur de la membrure 3
% g = la valeur normale de l'accélération de la pesanteur en m/s2
% m1 = masse de la base (kg)
% m2 = masse de la membrure 1 (kg)
% m3 = masse de la membrure 2 (kg)
% m4 = masse de la membrure 3 (kg)
% charge = charge porté par la pince (kg)

%%
%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];
if num_charge==1
charge=0.0;
elseif num_charge==2
charge=0.1;
else
charge=0.2;
end

if Materiau==1
mStructure=0.0477;
elseif Materiau==2
mStructure=0.0371;
elseif Materiau==3
mStructure=0.0333;
else
mStructure=0.0295;
end
vars=[0.0185 0.1191 0.1210 0.0865 0.1374 mStructure 0.1468 0.0803 charge 9.80665];

% Métal m2 = 0.0477 kg
% UDMAT m2 = 0.0371 kg
% UD m2 = 0.0333 kg
% MAT m2 = 0.0295 kg
%%
```



## A4.10.2. Block : Synchronisation

```
function Data_out=interp_trj(vars,acc,V,V0,qf,q0)

t11=(V(1)-V0(1))/acc(1);
t21=(qf(1)-q0(1))/V(1);

tf1=t11+t21;
%
t12=((V(2)-V0(2))/acc(2));
t22=(qf(2)-q0(2))/V(2);

tf2=t12+t22;
%
t13=((V(3)-V0(3))/acc(3));
t23=(qf(3)-q0(3))/V(3);

tf3=t13+t23;
%
t14=((V(4)-V0(4))/acc(4));
t24=(qf(4)-q0(4))/V(4);

tf4=t14+t24;
%
tf=[tf1 tf2 tf3 tf4];
T=[t11 t12 t13 t14 ;t21 t22 t23 t24];
%
max=0;
jmax=1;

for u=1:4
    if max<tf(u)
        max=tf(u);
        jmax=u;
    end
end
end
```

```

for j=1:4
    if j~=jmax;
        T(1,j)=T(1,jmax);
        T(2,j)=T(2,jmax);

        V(j)=(qf(j)-q0(j))/T(2,j);
        acc(j)=(V(j)-V0(j))/T(1,j);
    end
end

q01=q0(1);
q02=q0(2);
q03=q0(3);
q04=q0(4);

V1=V(1);
V2=V(2);
V3=V(3);
V4=V(4);

acc1=acc(1);
acc2=acc(2);
acc3=acc(3);
acc4=acc(4);

t11=T(1,1);
t12=T(1,2);
t13=T(1,3);
t14=T(1,4);

t21=T(2,1);
t22=T(2,2);
t23=T(2,3);
t24=T(2,4);

%tf=[tf1 tf2 tf3 tf4 ];
%T=[t11 t12 t13 t14 t15;t21 t22 t23 t24 ];
%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];

Data_out=[vars,t11,t12,t13,t14,t21,t22,t23,t24,V1,V2,V3,V4,acc1,acc2,acc3,acc4,q01,q02,q03,q04];
end

```

### A4.10.3. Block : Base

```
function C_ang1=base(Data_out)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,q];
%Data_out=[vars,t11,t12,t13,t14,t21,t22,t23,t24,V1,V2,V3,V4,acc1,acc2,acc3,acc4,q01,q02,q03,q04];

pas=0.01; % Temps de l'echantionnage

tf1=Data_out(11)+Data_out(15);

tau1=0:pas:Data_out(11);
tau2=Data_out(11):pas:tf1-Data_out(11);
tau3=tf1-Data_out(11):pas:tf1;

q11=(Data_out(23)*(Data_out(11).^2))./2;
q22=q11+Data_out(19)*(Data_out(15)-Data_out(11));

q1=Data_out(27)+Data_out(23).*(tau1.^2)./2;
q2=Data_out(27)+q11+Data_out(19).*(tau2-Data_out(11));
q3=Data_out(27)+q22+Data_out(19).*(tau3-Data_out(15))-((Data_out(23).*(tau3-Data_out(15)).^2)./2);

dq1=Data_out(23).*tau1;
dq2=Data_out(19).*ones(1,length(tau2));
dq3=Data_out(19)-((Data_out(23).*(tau3-Data_out(15)))));

ddq1=Data_out(23).*ones(1,length(tau1));
ddq2=zeros(1,length(tau2));
ddq3=-Data_out(23).*ones(1,length(tau3));

q1=q1';
q2=q2(2:end)';
q3=q3(2:end)';

dq1=dq1';
dq2=dq2(2:end)';
dq3=dq3(2:end)';

ddq1=ddq1';
ddq2=ddq2(2:end)';
ddq3=ddq3(2:end)';

% concatenation
q = [q1;q2;q3];
dq = [dq1;dq2;dq3];
ddq = [ddq1;ddq2;ddq3];

C_ang1(:,1)=q;
C_ang1(:,2)=dq;
C_ang1(:,3)=ddq;

end
```

### A4.10.5. Block : membre 1 (épaule-coude)

```
function C_ang2=membre1(Data_out)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];
%Data_out=[vars,t11,t12,t13,t14,t21,t22,t23,t24,V1,V2,V3,V4,acc1,acc2,acc3,acc4,q01,q02,q03,q04];

pas=0.01; % Temps de l'echantionnage

tf2=Data_out(12)+Data_out(16);

tau1=0:pas:Data_out(12);
tau2=Data_out(12):pas:tf2-Data_out(12);
tau3=tf2-Data_out(12):pas:tf2;

q11=(Data_out(24)*(Data_out(12).^2))./2;
q22=q11+Data_out(20)*(Data_out(16)-Data_out(12));

q1=Data_out(28)+Data_out(24).*(tau1.^2)./2;
q2=Data_out(28)+q11+Data_out(20).*(tau2-Data_out(12));
q3=Data_out(28)+q22+Data_out(20).*(tau3-Data_out(16))-((Data_out(24).*(tau3-Data_out(16)).^2)./2);

dq1=Data_out(24).*(tau1);
dq2=Data_out(20).*(ones(1,length(tau2)));
dq3=Data_out(20)-((Data_out(24).*(tau3-Data_out(16))));

ddq1=Data_out(24).*(ones(1,length(tau1)));
ddq2=zeros(1,length(tau2));
ddq3=-Data_out(24).*(ones(1,length(tau3)));

q1=q1';
q2=q2(2:end)';
q3=q3(2:end)';

dq1=dq1';
dq2=dq2(2:end)';
dq3=dq3(2:end)';

ddq1=ddq1';
ddq2=ddq2(2:end)';
ddq3=ddq3(2:end)';

% concatenation
q = [q1;q2;q3];
dq = [dq1;dq2;dq3];
ddq = [ddq1;ddq2;ddq3];

C_ang2(:,1)=q;
C_ang2(:,2)=dq;
C_ang2(:,3)=ddq;

end
```

#### A4.10.6. Block : membre 2 (coude-poignet)

```
function C_ang3=membre2(Data_out)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];
%Data_out=[vars,t11,t12,t13,t14,t21,t22,t23,t24,V1,V2,V3,V4,acc1,acc2,acc3,acc4,q01,q02,q03,q04];

pas=0.01; % Temps de l'echantionnage

tf3=Data_out(13)+Data_out(17);

tau1=0:pas:Data_out(13);
tau2=Data_out(13):pas:tf3-Data_out(13);
tau3=tf3-Data_out(13):pas:tf3;

q11=(Data_out(25)*(Data_out(13).^2))./2;
q22=q11+Data_out(21)*(Data_out(17)-Data_out(13));

q1=Data_out(29)+Data_out(25).*(tau1.^2)./2;
q2=Data_out(29)+q11+Data_out(21).*(tau2-Data_out(13));
q3=Data_out(29)+q22+Data_out(21).*(tau3-Data_out(17))-((Data_out(25).*(tau3-Data_out(17)).^2)./2);

dq1=Data_out(25).*tau1;
dq2=Data_out(21).*ones(1,length(tau2));
dq3=Data_out(21)-((Data_out(25).*(tau3-Data_out(17))));

ddq1=Data_out(25).*ones(1,length(tau1));
ddq2=zeros(1,length(tau2));
ddq3=-Data_out(25).*ones(1,length(tau3));

q1=q1';
q2=q2(2:end)';
q3=q3(2:end)';

dq1=dq1';
dq2=dq2(2:end)';
dq3=dq3(2:end)';

ddq1=ddq1';
ddq2=ddq2(2:end)';
ddq3=ddq3(2:end)';

% concatenation
q = [q1;q2;q3];
dq = [dq1;dq2;dq3];
ddq = [ddq1;ddq2;ddq3];

C_ang3(:,1)=q;
C_ang3(:,2)=dq;
C_ang3(:,3)=ddq;

end
```



### A4.10.7. Block : membre 3 (poignet-pince)

```
function C_ang4=membre3(Data_out)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];
%Data_out=[vars,t11,t12,t13,t14,t21,t22,t23,t24,V1,V2,V3,V4,acc1,acc2,acc3,acc4,q01,q02,q03,q04];

pas=0.01; % Temps de l'echantionnage

tf4=Data_out(14)+Data_out(18);

tau1=0:pas:Data_out(14);
tau2=Data_out(14):pas:tf4-Data_out(14);
tau3=tf4-Data_out(14):pas:tf4;

q11=(Data_out(26)*(Data_out(14).^2))./2;
q22=q11+Data_out(22)*(Data_out(18)-Data_out(14));

q1=Data_out(30)+Data_out(26).*(tau1.^2)./2;
q2=Data_out(30)+q11+Data_out(22).*(tau2-Data_out(14));
q3=Data_out(30)+q22+Data_out(22).*(tau3-Data_out(18))-((Data_out(26).*(tau3-Data_out(18)).^2))./2;

dq1=Data_out(26).*(tau1);
dq2=Data_out(22).*(ones(1,length(tau2)));
dq3=Data_out(22)-((Data_out(26).*(tau3-Data_out(18))));

ddq1=Data_out(26).*(ones(1,length(tau1)));
ddq2=zeros(1,length(tau2));
ddq3=-Data_out(26).*(ones(1,length(tau3)));

q1=q1';
q2=q2(2:end)';
q3=q3(2:end)';

dq1=dq1';
dq2=dq2(2:end)';
dq3=dq3(2:end)';

ddq1=ddq1';
ddq2=ddq2(2:end)';
ddq3=ddq3(2:end)';

% concaténation
q = [q1;q2;q3];

dq = [dq1;dq2;dq3];
ddq = [ddq1;ddq2;ddq3];

C_ang4(:,1)=q;
C_ang4(:,2)=dq;
C_ang4(:,3)=ddq;

end
```

### A4.10.8. Block : vecteur temps

```
function t = Vct_temps(Data_out)

%Fonction pour former le vecteur temps
%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];
%Data_out=[vars,t11,t12,t13,t14,t21,t22,t23,t24,V1,V2,V3,V4,acc1,acc2,acc3,acc4,q01,q02,q03,q04];

pas=0.01; % Temps de l'echantionnage

tf=Data_out(13)+Data_out(15);

taul=0:pas:Data_out(13);
tau2=Data_out(13):pas:tf-Data_out(13);
tau3=tf-Data_out(13):pas:tf;

taul=taul';
tau2=tau2(2:end)';
tau3=tau3(2:end)';

t=[taul;tau2;tau3];
end
```

### A4.10.9. Block : Concaténation

```
function [q,dq,ddq]=fnc(q1,dq1,ddq1,q2,dq2,ddq2,q3,dq3,ddq3,q4,dq4,ddq4)

q=zeros(length(q1),4);
dq=zeros(length(q1),4);
ddq=zeros(length(q1),4);

q(:,1)=q1;
q(:,2)=q2;
q(:,3)=q3;
q(:,4)=q4;

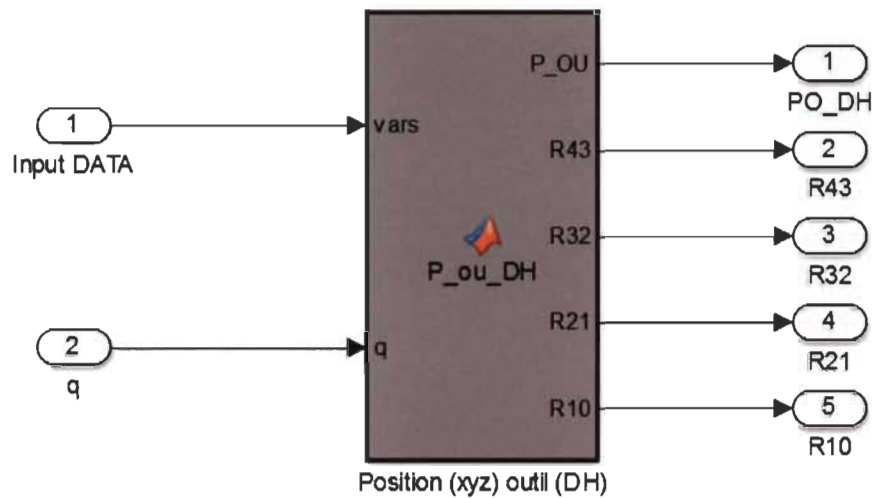
dq(:,1)=dq1;
dq(:,2)=dq2;
dq(:,3)=dq3;
dq(:,4)=dq4;

ddq(:,1)=ddq1;
ddq(:,2)=ddq2;
ddq(:,3)=ddq3;
ddq(:,4)=ddq4;

q=deg2rad(q);
dq=deg2rad(dq);
ddq=deg2rad(ddq);
end
```



#### A4.10.10. Position de l'effecteur : convention de DH



```
function [P_OU,R43,R32,R21,R10]=P_ou_DH(vars,q)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,m5,g];

q1=q(:,1);
q2=q(:,2);
q3=q(:,3);
q4=q(:,4);

P_OU=zeros(length(q1),3);

R43= repmat(zeros(3,3),[1 1 length(q1)]);
R32= repmat(zeros(3,3),[1 1 length(q1)]);
R21= repmat(zeros(3,3),[1 1 length(q1)]);
R10= repmat(zeros(3,3),[1 1 length(q1)]);

for i=1:length(q1)

alpha=[pi/2 0 0 -pi/2];
theta=[q1(i) q2(i) q3(i) q4(i)];

cth1=cos(theta(1));
cth2=cos(theta(2));
cth3=cos(theta(3));
cth4=cos(theta(4));

ca1=cos(alpha(1));
ca2=cos(alpha(2));
ca3=cos(alpha(3));
ca4=cos(alpha(4));

sth1=sin(theta(1));
sth2=sin(theta(2));
sth3=sin(theta(3));
sth4=sin(theta(4));

sa1=sin(alpha(1));
sa2=sin(alpha(2));
sa3=sin(alpha(3));
sa4=sin(alpha(4));
```

```

a=[0 vars(2) vars(3) vars(4)];
d=[vars(1) 0 0 0];

A1= [cth1 -sth1*ca1 sth1*sa1 a(1)*cth1;
     sth1 cth1*ca1 -cth1*sa1 a(1)*sth1;
     0 sa1 ca1 d(1);
     0 0 0 1];

A2= [cth2 -sth2*ca2 sth2*sa2 a(2)*cth2;
     sth2 cth2*ca2 -cth2*sa2 a(2)*sth2;
     0 sa2 ca2 d(2);
     0 0 0 1];

A3= [cth3 -sth3*ca3 sth3*sa3 a(3)*cth3;
     sth3 cth3*ca3 -cth3*sa3 a(3)*sth3;
     0 sa3 ca3 d(3);
     0 0 0 1];

A4= [cth4 -sth4*ca4 sth4*sa4 a(4)*cth4;
     sth4 cth4*ca4 -cth4*sa4 a(4)*sth4;
     0 sa4 ca4 d(4);
     0 0 0 1];

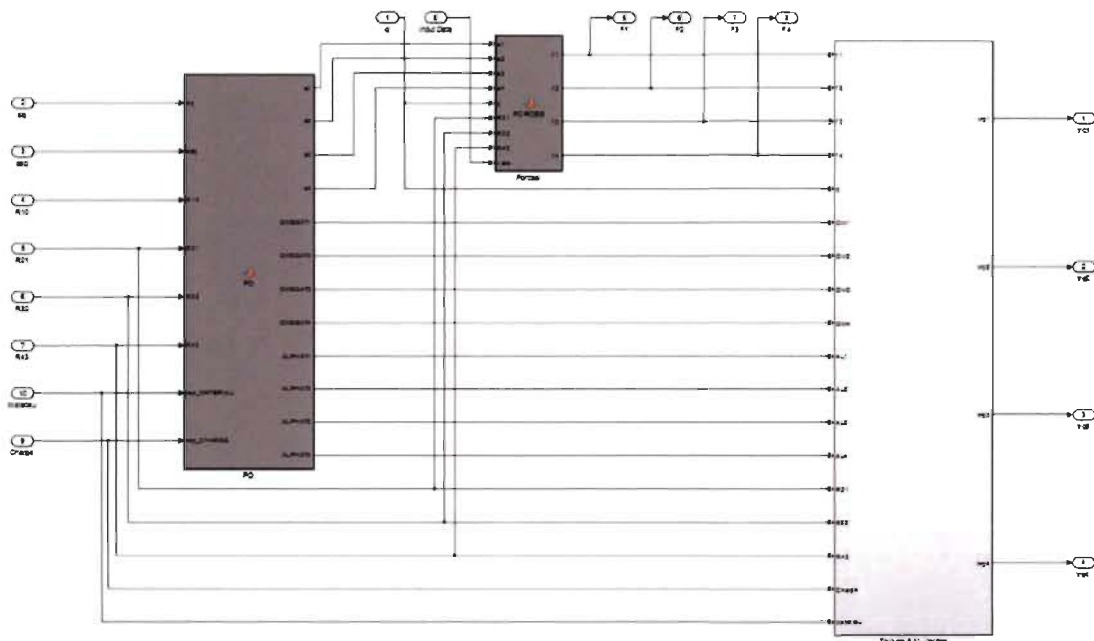
T05=A1*A2*A3*A4;

P_OU(i,:)=T05(1:3,4);

R43(:, :, i)=A4(1:3,1:3);
R32(:, :, i)=A3(1:3,1:3);
R21(:, :, i)=A2(1:3,1:3);
R10(:, :, i)=A1(1:3,1:3);
end
end

```

#### A4.10.11. Modélisation inverse dynamique



## A4.10.12. Block : Passe directe (calcul cinématique)

```
function
[a1,a2,a3,a4,OMEGAT1,OMEGAT2,OMEGAT3,OMEGAT4,ALPHAT1,ALPHAT2,ALPHAT3,ALPHAT4]=PD(dq,ddq,R10,R
21,R32,R43,rep_MATERIAU,rep_CHARGE)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,m5,g];

ALPHAT0=[0;0;0];
OMEGAT0=[0;0;0];
ae0=[0;0;0];

dq1=dq(:,1);
dq2=dq(:,2);
dq3=dq(:,3);
dq4=dq(:,4);

ddq1=ddq(:,1);
ddq2=ddq(:,2);
ddq3=ddq(:,3);
ddq4=ddq(:,4);

OMEGAT1=zeros(3,length(dq1));
OMEGAT2=zeros(3,length(dq1));
OMEGAT3=zeros(3,length(dq1));
OMEGAT4=zeros(3,length(dq1));

ALPHAT1=zeros(3,length(dq1));
ALPHAT2=zeros(3,length(dq1));
ALPHAT3=zeros(3,length(dq1));
ALPHAT4=zeros(3,length(dq1));

a1=zeros(3,length(dq1));
a2=zeros(3,length(dq1));
a3=zeros(3,length(dq1));
a4=zeros(3,length(dq1));

if rep_MATERIAU==1
    % Métal
    L2C2=[0.0624;0;0.0350];    % L(iCi)
    L23=[0.1191;0;0.0071];    % L(i,i+1);
elseif rep_MATERIAU==2
    % UDMAT
    L2C2=[0.0624;0;0.0350];    % L(iCi)
    L23=[0.1191;0;0.0068];    % L(i,i+1);
elseif rep_MATERIAU==3
    % UD
    L2C2=[0.0616;0;0.0361];
    L23=[0.1191;0;0.0071];
else
    % MAT
    L2C2=[0.0630;0;0.0371];
    L23=[0.1191;0;0.0075];
end

if rep_CHARGE==1
    L4C4=[0.0430;0.0489;0.0267];    % charge = 0.0 g
elseif rep_CHARGE==2
    L4C4=[0.0601;0.0024;0.0255];    % charge = 100 g
else
    L4C4=[0.0650;0.0017;0.0251];    % charge = 200 g
end

% L(i,i+1);
L12=[0.0302;0.0046;0.0185];
L34=[0.1210;0.0006;0];

%L(iCi)
L1C1=[0.0030;0.0139;0.0138];
L3C3=[0.0473;0;0.0224];
```

```

for i=1:length(dq1)

r01T=R01(:, :, i);
r12T=R12(:, :, i);
r23T=R23(:, :, i);
r34T=R34(:, :, i);

OMEGA1=[0;0;dq1(i)];
OMEGA2=[0;0;dq2(i)];
OMEGA3=[0;0;dq3(i)];
OMEGA4=[0;0;dq4(i)];

ALPHAT1=[0;0;ddq1(i)];
ALPHAT2=[0;0;ddq2(i)];
ALPHAT3=[0;0;ddq3(i)];
ALPHAT4=[0;0;ddq4(i)];

OMEGAT1(:, i)=r01T*OMEGAT0+r01T*OMEGA1;
OMEGAT2(:, i)=r12T*OMEGAT1(:, i)+r12T*OMEGA2;
OMEGAT3(:, i)=r23T*OMEGAT2(:, i)+r23T*OMEGA3;
OMEGAT4(:, i)=r34T*OMEGAT3(:, i)+r34T*OMEGA4;

ALPHAT1=r01T*ALPHAT0+r01T*ALPHAT1;
ALPHAT2=r12T*ALPHAT1+r12T*ALPHAT2;
ALPHAT3=r23T*ALPHAT2+r23T*ALPHAT3;
ALPHAT4=r34T*ALPHAT3+r34T*ALPHAT4;

ALPHANT1=cross((r10T*OMEGA1), OMEGAT1(:, i));
ALPHANT2=cross((r21T*OMEGA2), OMEGAT2(:, i));
ALPHANT3=cross((r32T*OMEGA3), OMEGAT3(:, i));
ALPHANT4=cross((r43T*OMEGA4), OMEGAT4(:, i));

ALPHAT1(:, i)=ALPHAT1+ALPHANT1;
ALPHAT2(:, i)=ALPHAT2+ALPHANT2;
ALPHAT3(:, i)=ALPHAT3+ALPHANT3;
ALPHAT4(:, i)=ALPHAT4+ALPHANT4;

ae1=r01T*ae0+cross(ALPHAT1(:, i), (r01T*L12))+cross(OMEGAT1(:, i), cross(OMEGAT1(:, i), (r01T*L12)));
ae2=r12T*ae1+cross(ALPHAT2(:, i), (r12T*L23))+cross(OMEGAT2(:, i), cross(OMEGAT2(:, i), (r12T*L23)));
ae3=r23T*ae2+cross(ALPHAT3(:, i), (r23T*L34))+cross(OMEGAT3(:, i), cross(OMEGAT3(:, i), (r23T*L34)));

a1(:, i)=r01T*ae0+cross(ALPHAT1(:, i), (r01T*L1C1))+cross(OMEGAT1(:, i), cross(OMEGAT1(:, i), (r01T*L1C1)));
a2(:, i)=r12T*ae1+cross(ALPHAT2(:, i), (r12T*L2C2))+cross(OMEGAT2(:, i), cross(OMEGAT2(:, i), (r12T*L2C2)));
a3(:, i)=r23T*ae2+cross(ALPHAT3(:, i), (r23T*L3C3))+cross(OMEGAT3(:, i), cross(OMEGAT3(:, i), (r23T*L3C3)));
a4(:, i)=r34T*ae3+cross(ALPHAT4(:, i), (r34T*L4C4))+cross(OMEGAT4(:, i), cross(OMEGAT4(:, i), (r34T*L4C4)));
end
end

```

### A4.10.13. Block: Forces

```
function [f1,f2,f3,f4]=FORCES(a1,a2,a3,a4,q,R21,R32,R43,vars)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,charge,g];

q1=q(:,1);
q2=q(:,2);
q3=q(:,3);
q4=q(:,4);

c2=cos(q2);
c32=cos(q3+q2);
c432=cos(q4+q3+q2);

s2=sin(q2);
s32=sin(q3+q2);
s432=sin(q4+q3+q2);

f1=zeros(3,length(q1));
f2=zeros(3,length(q1));
f3=zeros(3,length(q1));
f4=zeros(3,length(q1));

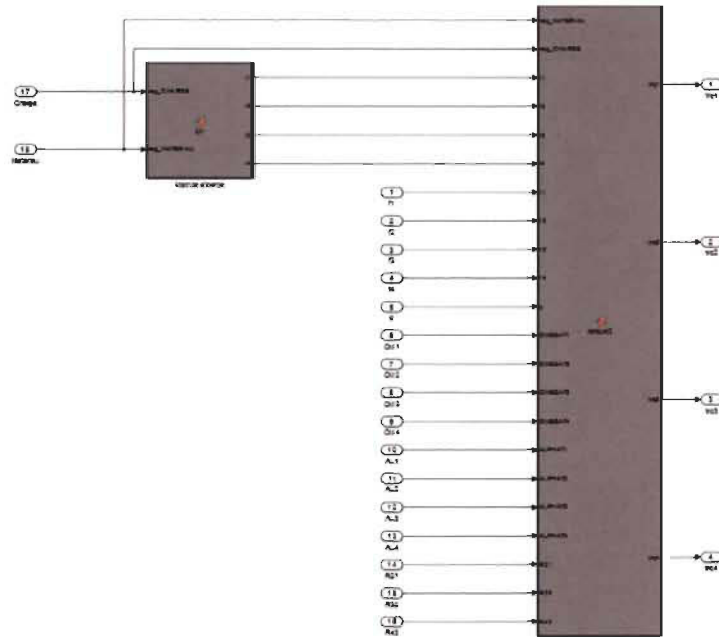
for i=1:length(q1)
    g1=[0;0;-vars(10)];
    g2=[-vars(10)*s2(i);vars(10)*c2(i);0];
    g3=[-vars(10)*s32(i);vars(10)*c32(i);0];
    g4=[-vars(10)*s432(i);vars(10)*c432(i);0];

    r12=R12(:, :, i);
    r23=R23(:, :, i);
    r34=R34(:, :, i);

    f4(:,i)=(vars(8)+vars(9))*a4(:,i)-(vars(8)+vars(9))*g4;
    f3(:,i)=vars(7)*a3(:,i)+r43*f4(:,i)-vars(7)*g3;
    f2(:,i)=vars(6)*a2(:,i)+r32*f3(:,i)-vars(6)*g2;
    f1(:,i)=vars(5)*a1(:,i)+r21*f2(:,i)-vars(5)*g1;
end
end
```



#### A4.10.14. Block: Matrice d'inertie



```
function [I1,I2,I3,I4]=MI(rep_CHARGE,rep_MATERIAU)
%I4=[I4xx -I4xy -I4xz;-I4yz I4yy -I4yz;-I4zx -I4zy I4zz];
%I3=[I3xx -I3xy I3xz;-I3yz I3yy -I3yz;-I3zx -I3zy I3zz];
%I2=[I2xx -I2xy I2xz;-I2yz I2yy -I2yz;-I2zx -I2zy I2zz];
%I1=[I1xx -I1xy I1xz;-I1yz I1yy -I1yz;-I1zx -I1zy I1zz];

I1=[72230.13 -1701.44 -84.44;-1701.44 57373.41 5329.79;-84.44 5329.79 95569.49]*1e-9;

I3=[26505.22 807.43 25889.66;807.43 527126.56 1304.21;25889.66 1304.21 515531.07]*1e-9;

if rep_CHARGE==1
I4=[29706.59 951.63 -2148.95;951.63 46147.97 -2529.08;-2148.95 -2529.08 33522.80]*1e-9;
charge = 0.0 g
elseif rep_CHARGE==2
I4=[40433.22 -5332.81 916.94;-5332.81 100017.78 -2984.73;916.94 -2984.73 84550.63]*1e-9;
charge = 100 g
else
I4=[50334.23 -7133.53 1795.43;-7133.53 123559.20 -3115.29;1795.43 -3115.29 104742.94]*1e-9;
% charge = 200 g
end

if rep_MATERIAU==1
% Métal masse = 0.0465 kg
I2=[36873.91 0 1610.04;0 118012.10 0;1610.04 0 85718.68]*1e-9;
elseif rep_MATERIAU==2
% UD-MAT masse = 0.03588 kg
I2=[27754.97 0 1877.33;0 97049.28 0;1877.33 0 72804.74]*1e-9;
elseif rep_MATERIAU==3
% UD masse = 0.03178 kg
I2=[24969.00 0 1399.00;0 87858.33 0;1399.00 0 66010.31]*1e-9;
else
% MAT masse = 0.02803 kg
I2=[22410.62 0 1624.64;0 83191.34 0;1624.64 0 63514.60]*1e-9;
end
end
```

## A4.10.15. Block : Calcul de torques

```
function
[trq1,trq2,trq3,trq4]=torque2(rep_MATERIAU,rep_CHARGE,I1,I2,I3,I4,f1,f2,f3,f4,q,OMEGAT1,OMEGA
T2,OMEGAT3,OMEGAT4,ALPHAT1,ALPHAT2,ALPHAT3,ALPHAT4,R21,R32,R43)

%vars=[L1,L2,L3,L4,m1,m2,m3,m4,m5,g];

q2=q(:,2);

A=zeros(3,length(q2));
B=zeros(3,length(q2));
C=zeros(3,length(q2));

K=zeros(3,length(q2));
L=zeros(3,length(q2));
M=zeros(3,length(q2));
N=zeros(3,length(q2));
O=zeros(3,length(q2));
P=zeros(3,length(q2));
Q=zeros(3,length(q2));
R=zeros(3,length(q2));
S=zeros(3,length(q2));
T=zeros(3,length(q2));
U=zeros(3,length(q2));
V=zeros(3,length(q2));
W=zeros(3,length(q2));
X=zeros(3,length(q2));
Z=zeros(3,length(q2));

if rep_MATERIAU==1
    % Métal
    L2C2=[0.06243;0;0.03501]; % L(iCi)
    L3C2=[0.0566;0;0.0279]; %L(i+1,i)
elseif rep_MATERIAU==2
    % UDMAT
    L2C2=[0.06244;0;0.03505]; % L(iCi)
    L3C2=[0.0566;0;0.0282]; %L(i+1,i)
elseif rep_MATERIAU==3
    % UD
    L2C2=[0.06156;0;0.0361];
    L3C2=[0.0575;0;0.0290];
else
    % MAT
    L2C2=[0.0630;0;0.0371];
    L3C2=[0.0561;0;0.0296];
end

if rep_CHARGE==1
    L4C4=[0.0430;0.0489;0.0267]; % charge = 0.0 g
elseif rep_CHARGE==2
    L4C4=[0.0601;0.0024;0.0255]; % charge = 100 g
else
    L4C4=[0.0650;0.0017;0.0251]; % charge = 200 g
end

%L(iCi)
L1C1=[0.0030;0.0139;0.0138];
L3C3=[0.0473;0.002;0.0224];

%L(i+1,i)
L4C3=[0.0737;0.0026;0.0224];
L2C1=[0.0331;0.0093;0.0047];
```

```

for i=1:length(q2)
    A(:,i)=I4*ALPHAT4(:,i);
    B(:,i)=cross(OMEGAT4(:,i),I4*OMEGAT4(:,i));
    C(:,i)=cross(f4(:,i),L4C4);
end
trq4=A+B-C;

for P2=1:length(q2)
    r43=R43(:, :, P2);
    K(:,P2)=r43*trq4(:,P2);
    L(:,P2)=cross(f3(:,P2),L3C3);
    M(:,P2)=cross((r43*f4(:,P2)),L4C3);
    N(:,P2)=I3*ALPHAT3(:,P2);
    O(:,P2)=cross(OMEGAT3(:,P2),I3*OMEGAT3(:,P2));
end
trq3=K-L+M+N+O;

for P1=1:length(q2)
    r32=R32(:, :, i);
    P(:,P1)=r32*trq3(:,P1);
    Q(:,P1)=cross(f2(:,P1),L2C2);
    R(:,P1)=cross((r32*f3(:,P1)),L3C2);
    S(:,P1)=I2*ALPHAT2(:,P1);
    T(:,P1)=cross(OMEGAT2(:,P1),I2*OMEGAT2(:,P1));
end
trq2=P-Q+R+S+T;

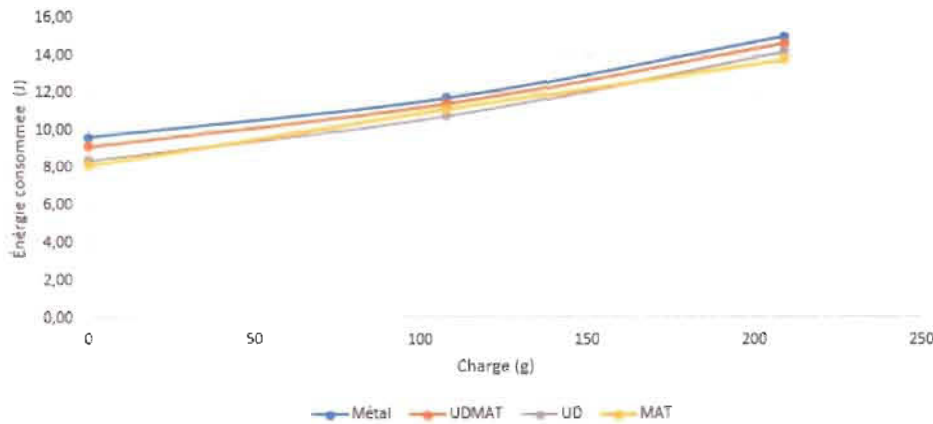
for P3=1:length(q2)
    r21=R21(:, :, i);
    U(:,P3)=r21*trq2(:,P3);
    V(:,P3)=cross(f1(:,P3),L1C1);
    W(:,P3)=cross((r21*f2(:,P3)),L2C1);
    X(:,P3)=I1*ALPHAT1(:,P3);
    Z(:,P3)=cross(OMEGAT1(:,P3),I1*OMEGAT1(:,P3));
end
trq1=U-V+W+X+Z;
%
end

```



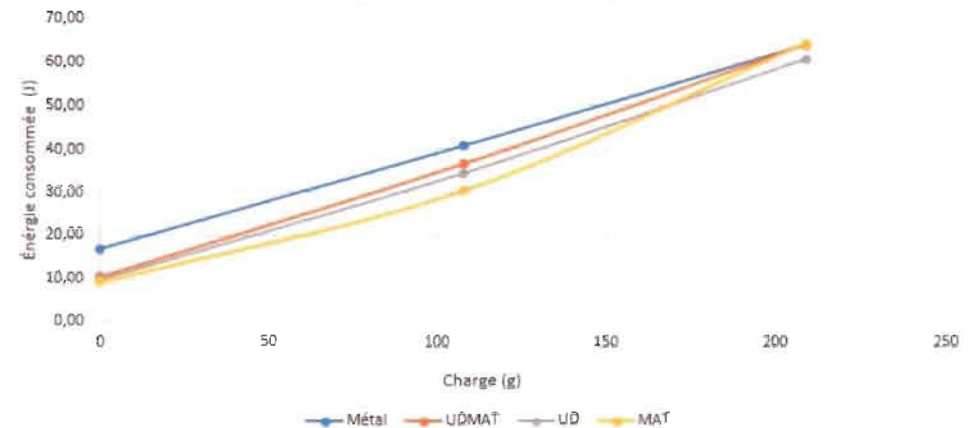
## Annexe 6 : Énergie consommée par les actionneurs pour les différentes structures

Énergie cumulée : Servo - Base



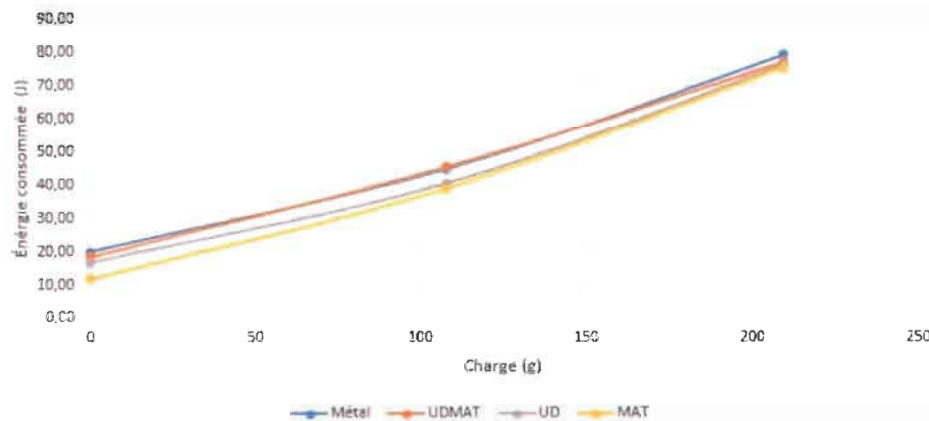
Énergie cumulée par servo-hanche en fonction de la charge pour les différentes structures

Énergie cumulée : Servo - Épaule



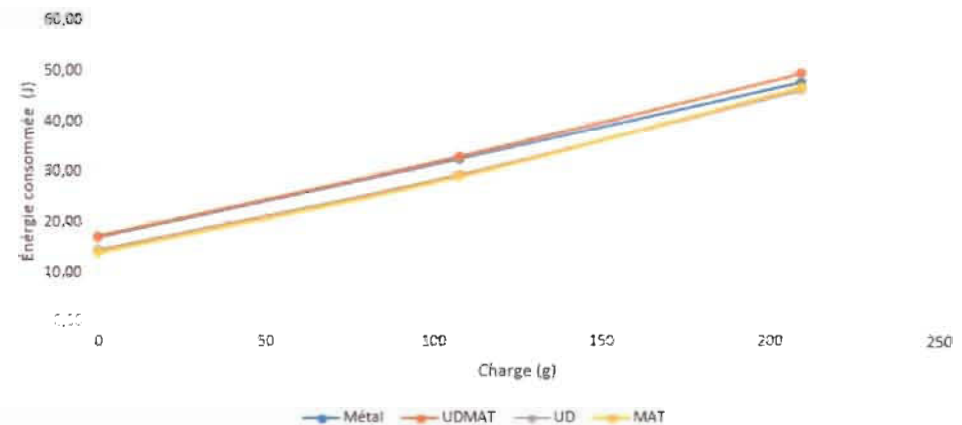
Énergie cumulée par servo-épaule en fonction de la charge pour les différentes structures

Énergie cumulée : Servo - Coude



Énergie cumulée par servo-coude en fonction de la charge pour les différentes structures

Énergie cumulée : Servo - Poignet



Énergie cumulée par servo-poignet en fonction de la charge pour les différentes structures

# Annexe 7 : Mesure de la répétabilité du manipulateur

- Répétabilité de l'éco-bras robotique UDMAT

	POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc		POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc		POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc
		107,035	3,681	191,019			107,746	3,047	183,618			106,452	2,013	166,652
25	n fois	Xr	Yr	Zr	25	n fois	Xr	Yr	Zr	25	n fois	Xr	Yr	Zr
	1	107,198	3,530	190,981		1	107,282	3,153	182,251		1	106,530	2,292	166,299
	2	106,797	3,164	190,966		2	107,481	2,810	182,492		2	106,344	2,387	165,703
	3	106,799	3,815	190,805		3	108,279	2,494	183,802		3	106,372	2,185	165,451
	4	106,894	3,045	191,052		4	107,998	2,809	183,353		4	106,209	2,353	165,454
	5	107,202	3,274	190,565		5	108,018	2,790	183,057		5	106,331	2,191	165,336
	6	106,993	3,761	190,928		6	108,086	2,834	182,986		6	106,613	2,302	165,560
	7	106,824	3,008	190,895		7	107,792	2,709	181,258		7	106,501	2,357	165,194
	8	106,937	3,035	191,365		8	107,730	2,821	182,270		8	106,696	2,229	165,139
	9	106,837	3,147	191,728		9	107,781	2,624	182,712		9	106,486	2,286	163,774
	10	106,804	3,130	191,589		10	107,647	2,951	182,260		10	106,360	2,296	163,450
	11	106,751	3,150	191,865		11	107,482	2,892	182,387		11	106,387	2,332	163,461
	12	106,945	3,021	191,251		12	107,142	3,147	182,591		12	106,098	2,444	163,087
	13	106,539	3,273	191,368		13	106,914	3,214	182,059		13	106,129	2,459	162,617
	14	106,359	3,086	191,466		14	107,049	3,203	182,144		14	106,285	2,318	162,757
	15	106,099	3,585	191,467		15	107,415	3,171	181,949		15	106,590	2,088	162,790
	16	106,725	3,162	191,241		16	107,751	2,618	182,213		16	106,582	2,121	162,595
	17	106,562	3,231	191,167		17	108,144	2,813	181,214		17	106,613	2,302	165,560
	18	106,622	3,257	191,212		18	108,081	2,964	181,526		18	106,501	2,357	165,194
	19	106,810	3,653	190,874		19	107,409	3,008	181,069		19	106,696	2,229	165,139
	20	106,737	3,859	191,489		20	107,767	2,657	181,110		20	106,792	2,501	163,866
	21	106,488	3,450	191,311		21	107,864	2,757	181,895		21	107,327	1,770	162,234
	22	106,488	3,302	190,882		22	107,850	2,679	181,467		22	107,307	1,811	162,135
	23	106,351	3,484	191,270		23	107,834	2,749	181,559		23	107,267	1,729	162,010
	24	106,422	3,544	190,801		24	107,965	2,710	181,590		24	107,426	1,740	162,146
	25	106,453	3,515	191,386		25	108,011	2,860	182,120		25	107,437	1,721	162,059

$X_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_r \right)$	106,705	107,711	106,635
$Y_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Y_r \right)$	3,339	2,841	2,192
$Z_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Z_r \right)$	191,197	182,133	163,961
$l_i = \sqrt{(X_r - X_{moy})^2 + (Y_r - Y_{moy})^2 + (Z_r - Z_{moy})^2}$			
$l_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$	0,449	0,706	1,395
$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{moy})^2}{n-1}}$	0,175	0,383	0,548
$RP_i = l_{moy} + 3 \times S_i$	0,974	1,856	3,041

RP de bras-UD-MAT robotique en fct de la charge portée par la pince

Charge (g)	69,030	124,370	174,930
Répétabilité (mm)	0,974	1,856	3,041

- Répétabilité de bras robotique Métal

	POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc		POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc		POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc
		111,519	0,292	181,612			108,791	1,425	164,114			108,141	1,553	155,555
<b>25</b>	<b>n fois</b>	Xr	Yr	Zr	<b>25</b>	<b>n fois</b>	Xr	Yr	Zr	<b>25</b>	<b>n fois</b>	Xr	Yr	Zr
	1	111,339	0,741	181,287		1	109,109	1,232	164,003		1	108,181	1,407	154,674
	2	111,528	0,218	181,685		2	109,251	1,651	166,132		2	108,301	1,576	153,139
	3	111,465	0,086	181,810		3	109,479	1,862	165,378		3	108,323	1,310	153,916
	4	111,386	0,305	181,638		4	109,474	1,829	164,894		4	108,957	0,891	153,915
	5	111,292	0,462	181,439		5	109,465	1,765	165,033		5	108,676	1,296	152,868
	6	111,418	0,108	181,584		6	109,604	1,773	165,094		6	108,196	1,363	153,538
	7	111,271	0,190	181,816		7	109,497	1,732	165,157		7	107,882	1,591	151,653
	8	111,387	0,115	181,907		8	109,533	1,748	165,088		8	108,135	1,465	151,553
	9	111,462	0,221	181,626		9	109,531	1,559	165,266		9	107,680	1,633	151,668
	10	111,499	0,123	181,728		10	109,418	1,318	166,011		10	108,039	1,619	151,396
	11	110,793	0,337	181,764		11	109,654	1,742	164,745		11	108,123	1,494	151,386
	12	110,596	0,539	181,690		12	109,396	1,353	165,668		12	108,449	1,304	151,275
	13	110,652	0,369	181,969		13	109,672	1,649	164,700		13	108,326	1,482	151,343
	14	110,593	0,392	181,941		14	109,567	1,727	164,570		14	108,367	1,476	150,969
	15	111,317	0,354	182,093		15	109,602	1,714	164,331		15	108,878	1,097	151,174
	16	110,700	0,304	182,526		16	109,701	1,520	164,803		16	108,934	1,135	151,049
	17	110,701	0,505	181,953		17	109,765	1,491	164,845		17	109,326	1,096	150,876
	18	111,500	0,116	181,624		18	109,905	1,549	164,663		18	109,483	0,788	151,046
	19	111,413	0,060	181,722		19	109,958	1,697	165,472		19	109,615	0,774	150,971
	20	111,377	0,116	181,788		20	109,834	1,688	165,756		20	109,390	1,039	150,924
	21	111,705	0,021	181,491		21	109,651	1,369	166,894		21	109,473	0,951	151,041
	22	111,093	0,105	181,941		22	109,926	1,365	166,093		22	109,417	0,822	150,648
	23	111,139	0,003	182,108		23	109,880	1,283	166,502		23	109,420	0,971	150,600
	24	111,435	0,088	181,550		24	109,915	1,448	166,243		24	109,531	0,926	150,736
	25	111,710	0,140	181,090		25	109,175	1,176	167,838		25	109,925	0,989	150,463

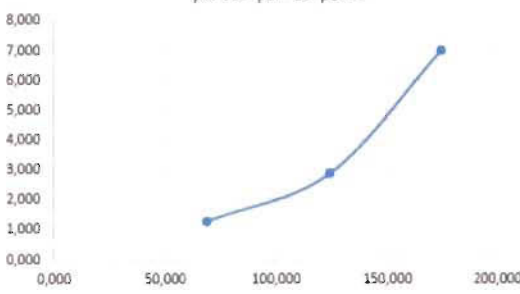
$X_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_r \right)$	111,235	109,598	108,761
$Y_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Y_r \right)$	0,241	1,570	1,219
$Z_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Z_r \right)$	181,751	165,407	151,713
$l_i = \sqrt{(X_r - X_{moy})^2 + (Y_r - Y_{moy})^2 + (Z_r - Z_{moy})^2}$			
$l_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$	0,419	0,760	1,235
$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{moy})^2}{n - 1}}$	0,219	0,504	0,600
$RP_i = l_{moy} + 3 \times S_i$	1,076	2,271	3,035

RP de bras-métale robotique en fct de la charge portée par la pince

Charge en g	69,030	124,370	174,930
Répétabilité (mm)	1,076	2,271	3,035

- Répétabilité de l'éco-bras robotique MAT

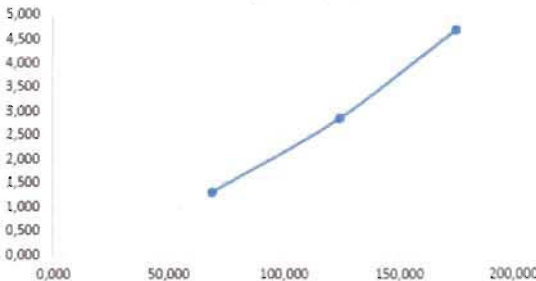
m1 = 69,03 g	POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc	m2 = 124,37 g	POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc	m3 = 174,93 g	POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc								
	Pt DU DÉPART	132,583	23,320	199,774		Pt DU DÉPART	156,958	-24,113	182,928		Pt DU DÉPART	132,576	22,976	168,050								
	25	n fois	Xr	Yr		Zr	25	n fois	Xr		Yr	Zr	25	n fois	Xr	Yr	Zr					
	1	132,583	23,320	199,774		1	157,572	-24,285	183,281		1	132,229	23,194	167,483								
	2	131,905	23,582	199,562		2	156,684	-23,878	182,326		2	132,627	23,354	166,164								
	3	132,069	23,585	199,340		3	156,985	-23,058	182,801		3	132,378	23,481	165,091								
	4	132,204	23,524	199,355		4	158,025	-24,230	182,699		4	132,666	23,444	165,054								
	5	132,369	23,469	199,195		5	156,781	-23,896	181,488		5	132,826	23,471	164,797								
	6	132,419	23,403	199,018		6	157,922	-23,870	181,135		6	132,765	23,729	163,181								
	7	133,210	23,777	200,039		7	157,135	-23,879	181,373		7	133,295	23,947	161,106								
	8	133,132	23,853	200,048		8	157,070	-23,820	181,186		8	133,976	23,692	161,127								
	9	132,274	24,083	199,956		9	158,110	-23,917	180,822		9	133,944	23,320	159,622								
	10	132,504	23,945	199,944		10	157,274	-23,850	181,123		10	134,085	23,238	159,575								
	11	132,478	23,966	198,958		11	158,384	-23,939	180,704		11	134,007	23,975	160,893								
	12	132,808	23,934	199,640		12	158,204	-24,050	180,839		12	133,608	23,257	159,599								
	13	132,617	23,951	199,052		13	158,525	-23,966	180,938		13	133,511	23,347	159,632								
	14	133,023	23,708	200,027		14	158,650	-24,023	179,788		14	133,347	23,275	159,688								
	15	132,631	23,880	199,013		15	158,464	-23,882	179,847		15	133,661	23,323	159,338								
	16	132,707	23,965	199,783		16	157,667	-23,776	180,020		16	134,203	23,362	159,146								
	17	132,736	23,857	198,710		17	158,023	-23,750	179,548		17	133,288	23,454	158,666								
	18	132,654	23,911	198,697		18	157,703	-23,812	179,726		18	133,292	23,562	158,683								
	19	132,549	23,961	198,745		19	157,630	-23,735	179,415		19	133,303	23,562	158,617								
	20	132,423	23,950	198,628		20	157,482	-23,743	179,518		20	133,778	23,016	157,920								
	21	132,350	23,909	198,804		21	157,775	-23,845	179,521		21	133,511	23,407	158,893								
	22	132,367	23,883	198,398		22	156,999	-23,553	179,311		22	133,465	23,883	159,582								
23	132,298	23,946	198,593	23	157,219	-23,686	179,694	23	133,754	23,551	159,184											
24	132,377	23,884	198,677	24	157,147	-23,823	179,632	24	133,642	23,409	158,541											
25	132,549	23,820	198,737	25	157,497	-23,775	179,670	25	133,782	23,648	158,229											
$X_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_r \right)$		132,529	157,637	133,398	<p>RP de bras-MAT robotique en fct de la charge portée par la pince</p> 																	
$Y_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Y_r \right)$		23,803	-23,842	23,476																		
$Z_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Z_r \right)$		199,228	180,656	160,792																		
$l_i = \sqrt{(X_r - X_{moy})^2 + (Y_r - Y_{moy})^2 + (Z_r - Z_{moy})^2}$																						
$l_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$		0,605	1,176	2,328																		
$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{moy})^2}{n - 1}}$		0,219	0,562	1,556																		
$RP_l = l_{moy} + 3 \times S_l$		1,262	2,863	6,995																		
					<table><tr><td>Charge (g)</td><td>69,030</td><td>124,370</td><td>174,930</td></tr><tr><td>Répétabilité (mm)</td><td>1,262</td><td>2,863</td><td>6,995</td></tr></table>										Charge (g)	69,030	124,370	174,930	Répétabilité (mm)	1,262	2,863	6,995
Charge (g)	69,030	124,370	174,930																			
Répétabilité (mm)	1,262	2,863	6,995																			

- Répétabilité de l'éco-bras robotique UD

	POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc		POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc		POINT COMMANDÉ	Xc	Yc	Zc
		107,304	-6,032	179,722			107,993	0,579	166,939			104,216	0,471	152,721
25	n fois	Xr	Yr	Zr	25	n fois	Xr	Yr	Zr	25	n fois	Xr	Yr	Zr
m1 = 69,03 g	1	107,764	-6,347	179,713	m2 = 124,37 g	1	107,734	0,534	165,976	m3 = 174,93 g	1	103,998	-0,033	150,200
	2	107,841	-6,422	179,620		2	107,716	0,446	165,593		2	104,256	-0,390	149,644
	3	106,847	-5,861	179,813		3	107,895	0,045	165,293		3	104,316	-0,318	148,797
	4	106,678	-5,716	179,823		4	107,806	0,223	165,007		4	104,546	-0,744	148,700
	5	106,746	-5,766	179,779		5	108,241	0,332	165,126		5	104,484	-0,579	148,011
	6	106,821	-5,930	179,916		6	107,807	0,111	164,607		6	104,486	-0,806	147,338
	7	106,387	-5,865	179,357		7	107,869	0,227	163,427		7	104,557	-0,699	148,445
	8	106,572	-5,761	179,689		8	107,582	0,006	164,142		8	104,289	-1,136	146,558
	9	106,657	-5,770	179,739		9	107,471	0,006	163,713		9	104,848	-1,435	145,964
	10	106,617	-5,671	179,476		10	107,715	0,320	163,953		10	104,359	-1,097	146,322
	11	106,563	-6,110	179,300		11	107,711	0,183	162,793		11	104,477	-1,184	145,746
	12	106,507	-5,963	179,143		12	107,719	0,149	162,622		12	104,518	-1,304	145,676
	13	106,665	-5,751	179,614		13	107,537	0,309	163,901		13	104,843	-1,463	145,694
	14	107,101	-6,394	179,883		14	107,471	0,395	162,715		14	104,305	-0,760	144,468
	15	106,665	-5,820	179,545		15	107,575	0,290	162,578		15	104,402	-0,726	145,038
	16	106,510	-5,975	179,397		16	107,740	0,176	162,585		16	104,359	-0,842	144,424
	17	106,411	-5,487	179,319		17	107,576	0,256	162,255		17	103,283	-0,140	144,105
	18	106,342	-5,915	179,968		18	107,389	0,288	162,169		18	104,148	-0,717	144,275
	19	106,667	-5,846	179,676		19	107,127	0,704	162,288		19	104,091	-0,772	144,017
	20	106,687	-5,831	179,337		20	107,569	0,260	162,405		20	104,087	-0,728	144,210
	21	106,452	-6,000	180,064		21	107,773	0,191	162,349		21	104,042	-0,556	144,295
	22	106,751	-5,769	179,360		22	107,391	0,646	162,762		22	104,110	-0,741	144,135
	23	106,684	-5,768	179,888		23	107,671	0,327	162,156		23	104,163	-0,700	144,601
	24	106,424	-6,005	180,337		24	107,314	0,686	162,018		24	103,488	-0,483	143,557
	25	106,769	-6,281	180,273		25	107,594	0,342	162,221		25	103,379	-0,242	143,938

$X_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n X_r \right)$	106,725	107,640	104,233
$Y_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Y_r \right)$	-5,921	0,295	-0,744
$Z_{moy} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Z_r \right)$	179,681	163,386	145,926
$l_i = \sqrt{(X_r - X_{moy})^2 + (Y_r - Y_{moy})^2 + (Z_r - Z_{moy})^2}$			
$l_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$	0,438	1,125	1,802
$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{moy})^2}{n - 1}}$	0,286	0,573	0,962
$RP_l = l_{moy} + 3 \times S_l$	1,295	2,843	4,689

RP de bras-UD robotique en fct de la charge portée par la pince



Charge (g)	69,030	124,370	174,930
Répétabilité (mm)	1,295	2,843	4,689